

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

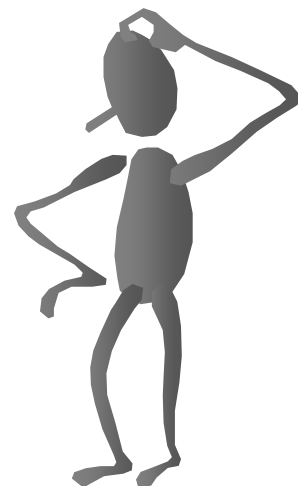
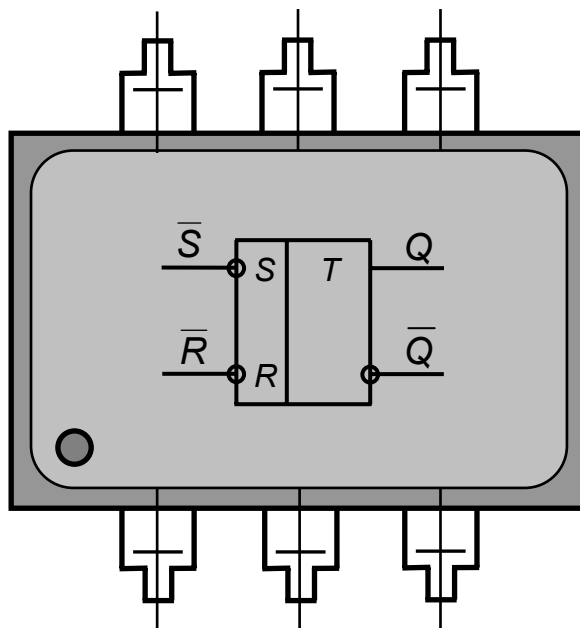


ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА ПІДСИЛЮЮЧІ ПРИСТРОЇ

методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт

(для студентів усіх форм навчання напрямку підготовки
6.050701 - "Електротехніка та електротехнології")



Промислова електроніка. Підсилюючі пристрої: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт (для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050701 - "Електротехніка та електротехнології") / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. А. Г. Сосков, Ю. П. Колонтаєвський О. Ф. Білоусов та ін. – Х.: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2013. – 59 с.


Укладачі: проф., д. т. н. А. Г. Сосков,
доц., к. т. н. Ю. П. Колонтаєвський,
доц., к. т. н. О. Ф. Білоусов,
доц., к. т. н. Я. Б. Форкун,
доц., к. т. н. Н. О. Сабалаєва.


Рецензент: професор, д. т. н. В. Б. Фінкельштейн


Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,
протокол № 2 від 21.06.2012 р.





ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ


 До виконання лабораторних робіт студенти допускаються після інструктажу з техніки електричної та протипожежної безпеки у лабораторії промислової електроніки, про що обов'язково робиться відповідний запис до журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці.


 Напруги на доступних для дотику виводах лабораторного устаткування не перевищують допустимих значень у 42 В для змінного струму та 110 В для постійного. Незважаючи на це, оскільки живлення устаткування та вимірювальних приладів здійснюється від мережі 220 В напруги змінного струму, при виконанні робіт не слід доторкати-ся одночасно до двох одиниць устаткування або приладів, а також до труб центрального опалення та використовувати у якості указок струмопровідні предмети (у т. ч. олівці з графітовим стрижнем).


 Забороняється розміщувати на робочих місцях одяг та інші особисті речі, що не використовуються для роботи.

 Забороняється без дозволу викладача переміщуватись на інші робочі місця, покидати робочі місця та межі лабораторії.

 При виявленні несправності устаткування та вимірювальних приладів або відхилень у їхній роботі, їх необхідно знеструмити і повідомити про це викладачеві.

 У разі виникнення нещасного випадку необхідно вимкнути живлення лабораторії, надати потерпілому першу допомогу, негайно сповістити викладача.

 У разі виникнення загоряння у лабораторії необхідно вимкнути живлення лабораторії та загасити полум'я вогнегасником, негайно сповістити викладача.

 Після закінчення виконання робіт необхідно вимкнути живлення устаткування та вимірювальних приладів, навести лад на робочому місці, сповістити викладача.

ВСТУП

Дані методичні вказівки до лабораторних робіт складені на основі робочої програми з дисципліни „Промислова електроніка” і призначені для студентів, які навчаються за напрямом підготовки 6.050701 - "Електротехніка та електротехнології".

Метою виконання лабораторних робіт є формування у студентів знань і практичних навиків дослідження напівпровідникових електронних приладів і типових каскадів підсилювачів напруги змінного та постійного струмів.

У результаті виконання даних робіт студенти повинні засвоїти принципи дії транзисторів різного типу та типових електронних підсилювачів, що застосовуються у пристроях автоматики й обчислювальної техніки, промислової електроніки.

Методика проведення лабораторних робіт пов'язана з наявністю необхідного устаткування і організацією робочих місць у лабораторії промислової електроніки кафедри теоретичної та загальної електротехніки, кількістю навчальних груп, які одночасно приступають до виконання лабораторних робіт.

Студенти повинні заздалегідь готуватися до занять у лабораторії, вивчаючи відповідні розділи теоретичного курсу за лекційними записами і навчальною літературою та знайомлячись зі змістом лабораторної роботи за даними методичними вказівками. Також заздалегідь необхідно заготовити таблиці для фіксації результатів експериментів і кальку або інший подібний прозорий матеріал для зняття осцилограм.

Перед виконанням лабораторної роботи студенти знайомляться на робочому місці з приладами та устаткуванням. Експериментальна частина виконується самостійно відповідно до методичних вказівок під керівництвом і за контролем викладача з дотриманням правил техніки безпеки.

Результати вимірів і осцилограми студенти обробляють у лабораторії, аналізуючи результати кожного дослідження.

За результатами виконання лабораторної роботи складається звіт (форму наведено у Додатку А). Звіт повинен бути складений чітко й акура-

тно. Особливу увагу варто приділяти формулюванню висновків за виконаною роботою, у яких необхідно зіставити результати експериментальних досліджень з відомими з теоретичного курсу закономірностями.

Схеми електричні принципові виконуються згідно з вимогами державних стандартів і з застосуванням креслярського знаряддя. У схемах, формулах і таблицях необхідно використовувати стандартні умовні позначення.

Для здачі лабораторної роботи студент повинен представити повністю оформлений звіт, уміти пояснити будь-який з проведених дослідів і відповісти на контрольні запитання викладача.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ ТА ОДИНОЧНИХ ПІДСИЛЮЮЧИХ КАСКАДІВ

1. МЕТА РОБОТИ

- 1) Дослідження статичних характеристик біполярного транзистора *n-p-n* типу.
- 2) Дослідження статичних характеристик польового транзистора з керуючим *p-n* переходом з каналом *n*-типу.
- 3) Дослідження властивостей одиночних підсилюючих каскадів зі спільним емітером (з СЕ) та зі спільним витоком (з СВ) і зі спільним колектором (з СК) та зі спільним стоком (з СС).

2. ОБЛАДНАННЯ

- 1) Стенд лабораторний № 1, 3.
- 2) Вольтметр цифровий В7-27.
- 3) Мультиметр ВР11.
- 4) Осцилограф С1-93 (С1-83).

3. ЗМІСТ РОБОТИ

- 1) Зняти і побудувати статичні вхідні і вихідні вольт-амперні характеристики (ВАХ) біполярного і польового транзисторів.
- 2) Дослідити роботу одиночних підсилюючих каскадів за різних значень напруги вхідного сигналу і опору навантаження.

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1. Ознайомитись з робочим місцем, устаткуванням і приладами.
- 4.2. Ввімкнути вимірювальні прилади та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановити у ліве положення.
- 4.3. Зняття статичних вольт-амперних характеристик (ВАХ) біполярного транзистора *n-p-n* типу
 - 4.3.1. Зняття статичних ВАХ біполярного і польового транзисторів проводити за допомогою схеми, що наведена на рис. 1.1 (верхня мнемосхема).

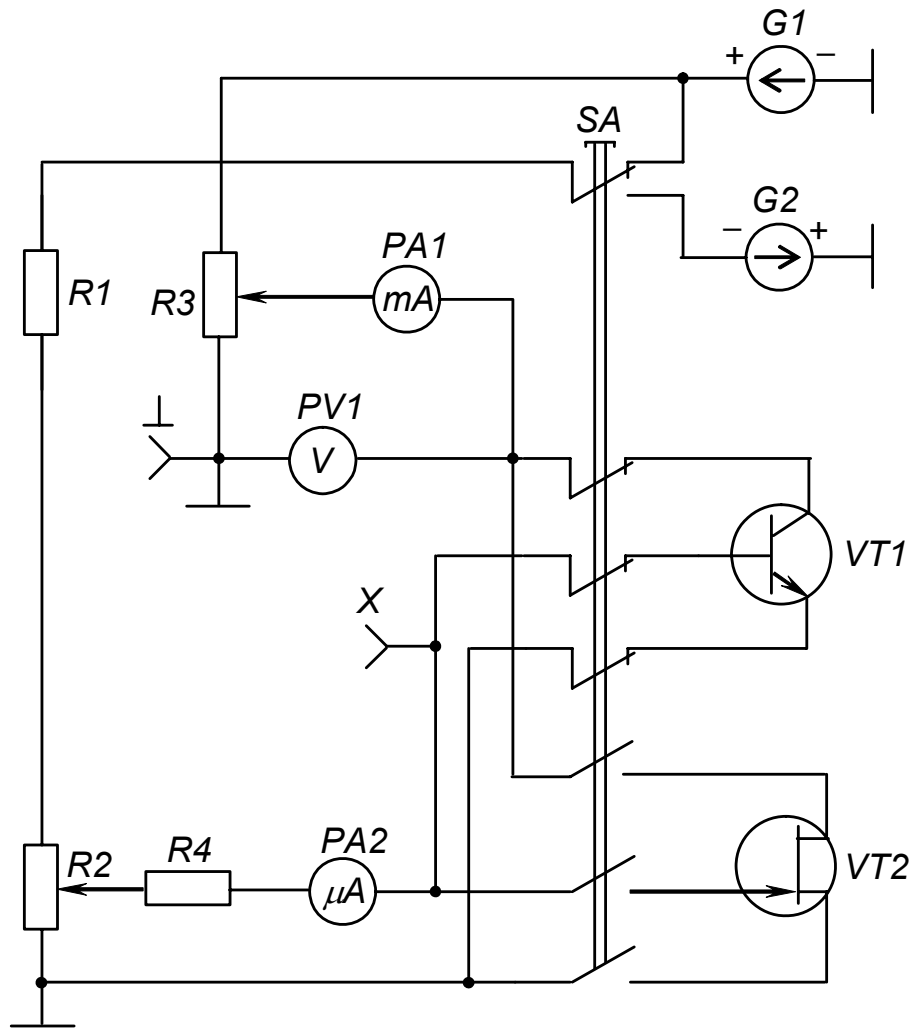


Рис. 1.1 – Схема для зняття ВАХ біполярного і польового транзисторів

схема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного). Міліамперметр $PA1$, вольтметр $PV1$ і мікроамперметр $PA2$ встановлені на лицьовій панелі стенда. Елементи комутації і регулювання вмонтовані в мнемосхему.

Для зняття ВАХ біполярного транзистора у схемі з СЕ перемикач SA встановити у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа поруч із транзистором $VT1$, що підмикається до джерела живлення, вимірювальних приладів і елементів регулювання). До клем X і „ \perp ” підімкнути мультиметр (або цифровий вольтметр), межу вимірювання якого встановити орієнтовно 2 В і задати режим вимірювання напруги постійного струму.

Зібрану у такий спосіб схему досліду наведено на рис. 1.2.

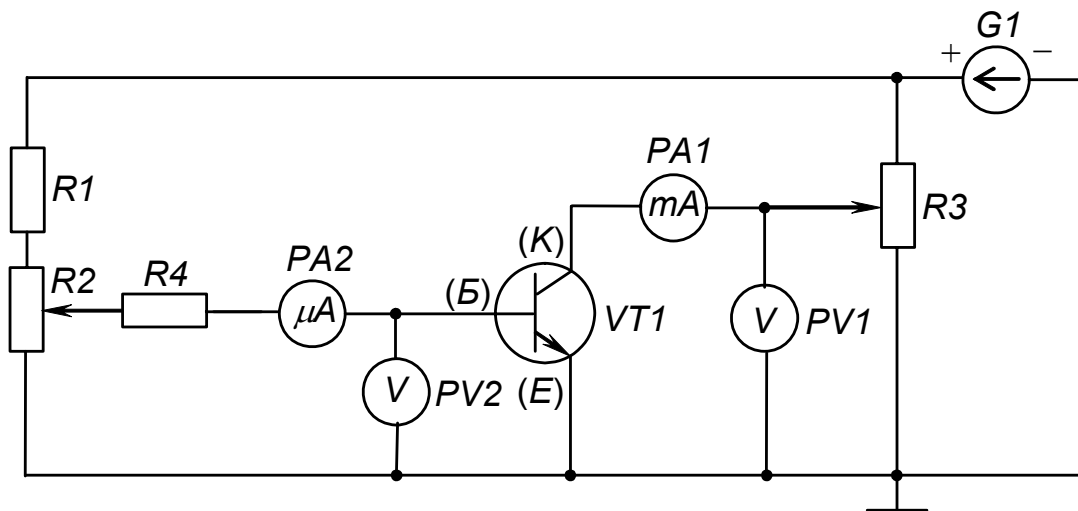


Рис. 1.2 – Схема досліду зняття ВАХ біполярного транзистора *n-p-n* типу

4.3.2. Зняти сімейство входних ВАХ $I_B = f(U_{BE})$ при значеннях U_{KE} рівних 0; 5 і 10 В.

Фіксовані значення U_{KE} задавати обертанням ручки резистора R_3 за годинниковою стрілкою, починаючи з крайнього лівого положення, і контролюючи за вольтметром $PV1$.

Обертаючи ручку резистора R_2 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення I_B за мікроамперметром $PA2$ і фіксувати відповідні значення U_{BE} за вольтметром $PV2$.

Результати вимірів занести у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Результати вимірів входних ВАХ біполярного транзистора

$I_B, \text{мкА}$	0	5	10	20	30	40	50	60	$U_{KE}, \text{В}$
$U_{BE}, \text{В}$									0
									5
									10

Примітка. У табл. 1.1 позиції, що відповідають значенням I_B , і не можуть бути встановлені за допомогою резистора R_2 , не заповнювати.

4.3.3. Зняти сімейство вихідних ВАХ $I_K = f(U_{KE})$ при фіксованих значеннях струму I_B рівних 0; 10; 30; 50 і 60 мкА, що задаються резистором R_2 за мікроамперметром $PA2$.

Для кожного фіксованого значення I_B , обертаючи ручку резистора R_3 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення U_{KE} за вольтметром $PV1$ й фіксувати за міліамперметром $PA1$ відповідні значення струму колектора I_K . Результати вимірів занести у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Результати вимірів вихідних ВАХ біполярного транзистора

$U_{KE}, \text{В}$	0	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	$I_B, \text{мкА}$
$I_K, \text{мА}$								0
								10
								30
								50
								60

4.4. Зняття статичних вольт-амперних характеристик (ВАХ) польового транзистора з керуючим p - n переходом

4.4.1. Для одержання схеми досліду зняття статичних ВАХ польового транзистора з СВ, наведеної на рис. 1.3, перемикач SA встановити у натиснуте положення (світиться сигнальна лампа поруч з транзистором $VT2$).

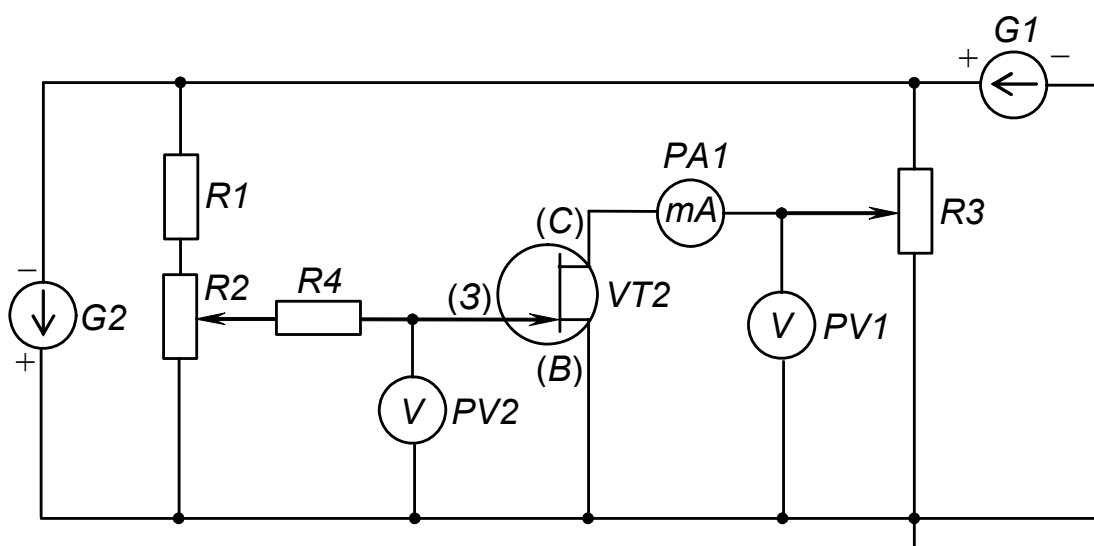


Рис. 1.3 – Схема досліду зняття ВАХ польового транзистора з керуючим p - n переходом

Зверніть увагу на те, що полярність напруги U_{3B} негативна (необхідно відповідно підімкнути мультиметр $PV2$).

4.4.2. Зняти сімейство стік-затворних ВАХ $I_C = f(U_{3B})$ при фіксованих значеннях напруги U_{CB} рівних 1; 5 і 10 В, що задаються резистором R_3 за вольтметром $PV1$.

Для кожного фіксованого значення U_{CB} , обертанням ручки резистора R_2 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення U_{3B} за вольтметром $PV2$ і фіксувати за міліамперметром $PA1$ відповідні значення струму стоку I_C .

Результати вимірів занести у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Результати вимірів стік-затворних ВАХ польового транзистора

$U_{ЗВ}, В$	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-1,2	-1,4	-1,8	$U_{СВ}, В$
$I_C, мА$										1
										5
										10

4.4.3. Зняти сімейство вихідних (стокових) характеристик $I_C = f(U_{ЗВ})$ при фіксованих значеннях напруг на затворі $U_{ЗВ}$, що задаються резистором R_2 за цифровим вольтметром $PV2$.

Для кожного фіксованого значення $U_{ЗВ}$, обертаючи ручку резистора R_3 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення U_C за вольтметром $PV1$ і фіксувати за міліамперметром $PA1$ відповідні значення струму I_C .

Результати вимірів занести у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 - Результати вимірів вихідних ВАХ польового транзистора

$U_{СВ}, В$	0	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	$U_{ЗВ}, В$
$I_C, мА$								0
								-0,25
								-0,5
								-0,75
								-1,0
								-1,25

4.5. Дослідження властивостей одиночних підсилюючих каскадів з СЕ (СВ) і з СК (СС)

4.5.1. Дослідження властивостей одиночних підсилюючих каскадів на біполярному і польовому транзисторах виконувати за допомогою схеми, наведеної на рис. 1.4 (нижня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

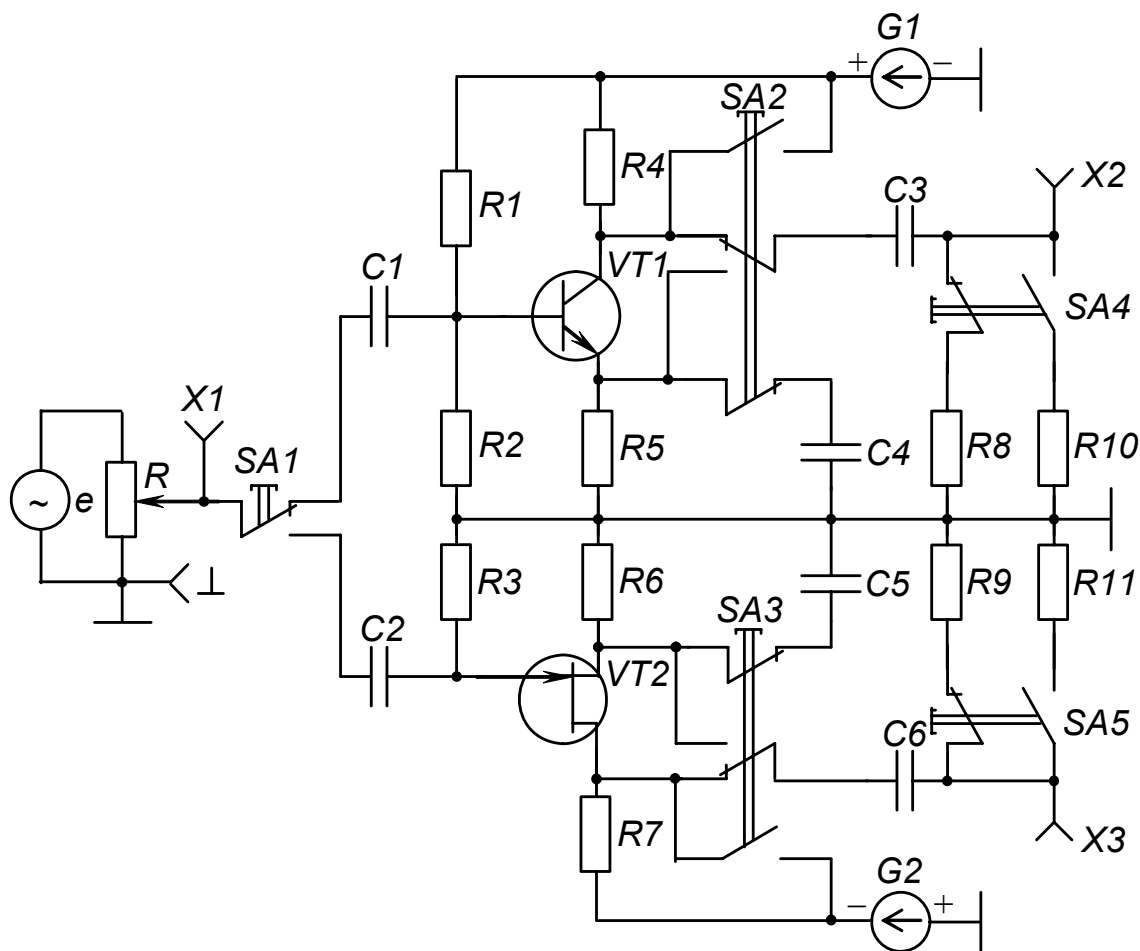


Рис. 1.4 – Схема для дослідження властивостей
одиначних підсилюючих каскадів

4.5.1.1. Підімкнути каскад на біполярному транзисторі $VT1$ до джерела живлення $G1$ і джерела вхідного сигналу e , встановивши перемикач $SA1$ у ненависнуте положення.

Зібрати схему підсилюючого каскаду з СЕ, встановивши перемикач $SA2$ у ненависнуте положення.

Підімкнути кабель першого каналу осцилографа сигнальним провідником до клем $X1$, а нульовим до клем „ \perp ”. Кабель другого каналу – до клем $X2$ і „ \perp ” відповідно.

Встановити ручку резистора R у середнє положення, а органи керування осцилографа у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення. Переконатися у працездатності каскаду: синусоїдний сигнал на виході (клем $X2$) знаходиться у протифазі до вхідного сигналу (клем $X1$) і має більшу амплітуду (підсилений).

Зарисувати осцилограми вхідного і вихідного сигналів каскаду для двох рівнів вхідного сигналу (задаються резистором R):

- 1) за відсутності помітних нелінійних викривлень вихідного сигналу;
- 2) за наявності помітних нелінійних викривлень вихідного сигналу.

4.5.1.2. Зняти амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ каскаду з СЕ для двох значень опору навантаження, що задаються перемикачем $SA4$ ($R_{н1} = 2,2 \text{ кОм}$ і $R_{н2} = 12 \text{ кОм}$).

До входу каскаду (клеми $X1$ і „ \perp ”) підімкнути цифровий вольтметр (вхід „ $\sim 300 \text{ V}$ ”, межу вимірювання встановити орієнтовно „ $\sim 1 \text{ V}$ ”), а до виходу, (клеми $X2$ і „ \perp ”) – мультиметр (межа вимірювання „ $\sim 20 \text{ V}$ ”).

Обертаючи ручку резистора R за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення вхідної напруги $U_{вх}$ за цифровим вольтметром і фіксувати відповідні значення вихідної напруги $U_{вих}$ за мультиметром.

Виміри провести для двох значень опору навантаження:

- 1) $R_{н1} = R_8 = 2,2 \text{ кОм}$ (перемикач $SA4$ – у ненависнутому положенні);
- 2) $R_{н2} = R_{10} = 12 \text{ кОм}$ (перемикач $SA4$ – у натиснутому положенні).

Результати вимірів занести у табл. 1.5.

Таблиця 1.5 - Результати вимірів амплітудної характеристики для підсилюючого каскаду з СЕ

$U_{вх}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$R_n, \text{ кОм}$
$U_{вих}, \text{ В}$							2,2
							12

4.5.1.3. Зібрати схему підсилюючого каскаду з СК (емітерний повторювач), установивши перемикач $SA2$ у натиснуте положення.

Підключити осцилограф аналогічно пп. 4.5.1.1 і переконатися у працездатності каскаду: синусоїдний сигнал на виході за амплітудою майже такий як і вхідний (дещо менший), відсутня інверсія (вихідна напруга синфазна вхідній) за будь-яких положень ручки резистора R .

Зарисувати осцилограми вхідного і вихідного сигналів каскаду для середнього положення ручки резистора R .

4.5.1.4. Зняти амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ каскаду з СК за методикою, викладеною в пп. 4.5.1.2. Результати вимірів занести у таблицю, аналогічну табл. 1.5.

4.5.2. Для дослідження підсилюючих каскадів на польовому транзисторі перемикач $SA1$ встановити у натиснуте положення.

4.5.2.1. Зібрати схему підсилюючого каскаду з СВ, встановивши перемикач $SA3$ у ненатиснуте положення.

4.5.2.2. Зняти амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ каскаду з СВ для двох значень опору навантаження ($R_{н1} = 10 \text{ кОм}$ і $R_{н2} = 100 \text{ кОм}$).

Методика вимірів аналогічна наведеній у пп. 4.5.1.2, тільки вихідною клемою, до якої підмикається мультиметр, є ХЗ, а завдання значення опору навантаження виконується перемикачем $SA5$:

- 1) $R_{н1} = R_9 = 10 \text{ кОм}$ ($SA5$ у ненатиснутому положенні);
- 2) $R_{н2} = R_{11} = 100 \text{ кОм}$ ($SA5$ у натиснутому положенні).

Результати вимірів занести у табл. 1.6.

Таблиця 1.6 - Результати вимірів амплітудної характеристики для підсилюючого каскаду з СВ

$U_{вх}, \text{В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	$R_{н}, \text{кОм}$
$U_{вих}, \text{В}$								10
								100

4.5.2.3. Зібрати схему підсилюючого каскаду з СС, встановивши перемикач $SA3$ у натиснуте положення.

4.5.2.4. Зняти амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ каскаду з СС за методикою, викладеною в пп. 4.5.2.2.

Результати вимірів занести у таблицю, аналогічну табл. 1.6.

4.6. Вимкнути прилади і живлення стенда лабораторного.

Навести порядок на робочому місці.

4.7. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.7.1. За даними табл. 1.1 побудувати сім'ю вхідних ВАХ біполярного транзистора. Зробити висновок про вплив значення колекторної напруги U_{KE} на положення вхідної характеристики.

4.7.2. За даними табл. 1.2 побудувати сім'ю вихідних ВАХ біполярного транзистора, зробити висновок про вплив значення струму бази I_B на положення вихідної характеристики.

4.7.3. За даними табл. 1.3 побудувати сім'ю стік-затворних ВАХ польового транзистора. Зробити висновок про вплив значення напруги U_{CB} на положення стік-затворної характеристики.

4.7.4. За даними табл. 1.4 побудувати сім'ю стокових (вихідних) ВАХ польового транзистора. Зробити висновок про вплив значення напруги на затворі U_{3B} на положення стокової характеристики. Порівняти вид стокових характеристик польового транзистора і вихідних характеристик біполярного транзистора.

4.7.5. За вихідними характеристиками біполярного транзистора визначити його коефіцієнт підсилення струму

$$\beta = \frac{I_K}{I_B}.$$

4.7.6. За стік-затворними характеристиками польового транзистора визначити крутизну характеристики керування

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}} \right|_{U_{CB}=const} \quad \text{при } U_{CB}=5 \text{ В},$$

а за стоковими характеристиками – внутрішній опір транзистора

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \right|_{U_3=const} \quad \text{при } U_{3B} = -0,5 \text{ В}.$$

4.7.7. За осцилограмами, знятими при виконанні завдання пп. 4.5.1.1, зробити висновок про правильність завдання режиму спокою підсилюючого каскаду, що працює у режимі класу А.

4.7.8. За даними пп. 4.5.1.2 (табл. 1.5), пп. 4.5.1.4, пп. 4.5.2.2 (табл. 1.6) та пп. 4.5.2.4 побудувати амплітудні характеристики підсилюючих каскадів і зробити висновок про вплив значення опору навантаження на положення характеристик для каскаду з СЕ (СВ) і каскаду з СК (СС).

5. ПОЯСНЕННЯ ДО РОБОТИ

5.1. Будова і принцип дії біполярних транзисторів

Біполярний транзистор являє собою електронний напівпровідниковий прилад, що має два взаємодіючих електронно-діркових переходи і складається з трьох областей: емітера, бази і колектора. p - n перехід, що утворюється на межі областей емітер-база, називається емітерним, а на

межі база-колектор – колекторним. Провідність бази може бути як електронною (n -типу), так і дірковою (p -типу). Відповідно розрізняють транзистори p - n - p та n - p - n типу.

На рис. 1.5 схематично наведено будову і умовні графічні позначення транзисторів n - p - n та p - n - p типу.

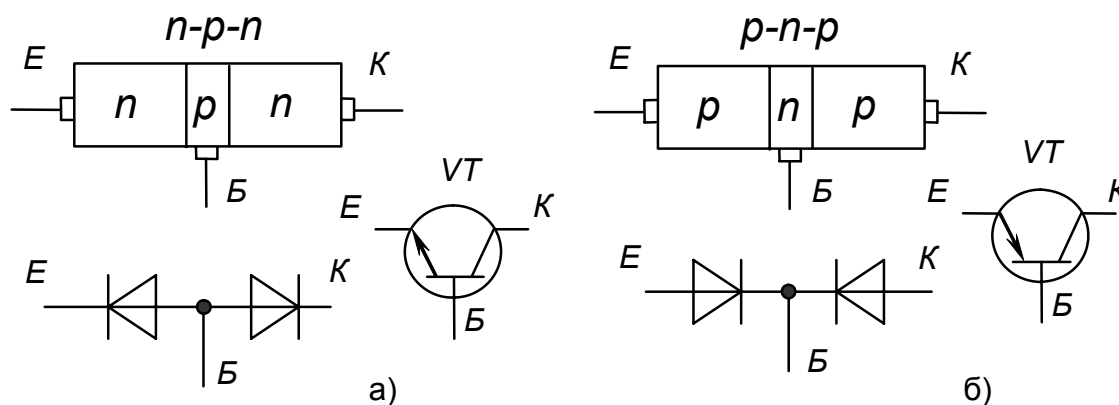


Рис. 1.5 - Будова і умовні позначення транзисторів n - p - n (а) та p - n - p (б) типів

Для забезпечення ефективного впливу емітерного переходу на колекторний, а отже забезпечення підсилюючих властивостей транзистора, необхідне виконання наступних основних вимог (реалізуються технологічно при виробництві):

- 1) база повинна бути багато тоншою за довжину дифузійного пробігу інжектованих до неї з емітера носіїв електричного заряду;
- 2) концентрація основних носіїв у базі повинна бути значно меншою за концентрацію основних носіїв в емітері, а концентрація основних носіїв у колекторі повинна бути багато меншою, ніж в емітері;
- 3) площа колекторного переходу повинна бути у декілька разів більшою за площу емітерного переходу.

Принцип дії транзисторів обох типів однаковий. Розходження полягає лише у тому, що в транзисторі p - n - p типу основний струм, що тече через структуру, створюється дірками, інжектованими з емітера, а у транзисторі n - p - n типу – електронами (напрямок протікання струму через транзистор вказує стрілка на його умовному позначенні).

Розглянемо принцип дії біполярного транзистора на прикладі транзистора структури n - p - n типу.

Якщо до приладу не прикладена зовнішня напруга, через обидва p - n переходи протікають струми дифузії і дрейфу, як і в звичайному діоді.

Оскільки вони врівноважують один одного, сумарний струм через кожен p - n перехід, а значить і через весь прилад дорівнює нулю.

Підмикання джерела E_K , як показано на рис. 1.6, а, зміщує колекторний перехід у зворотному напрямку і, у результаті, через нього протікає невеликий струм, зумовлений дрейфом через перехід неосновних носіїв, що виникають з-за термогенерації (у даному разі, електронів) – струм I_{K0} .

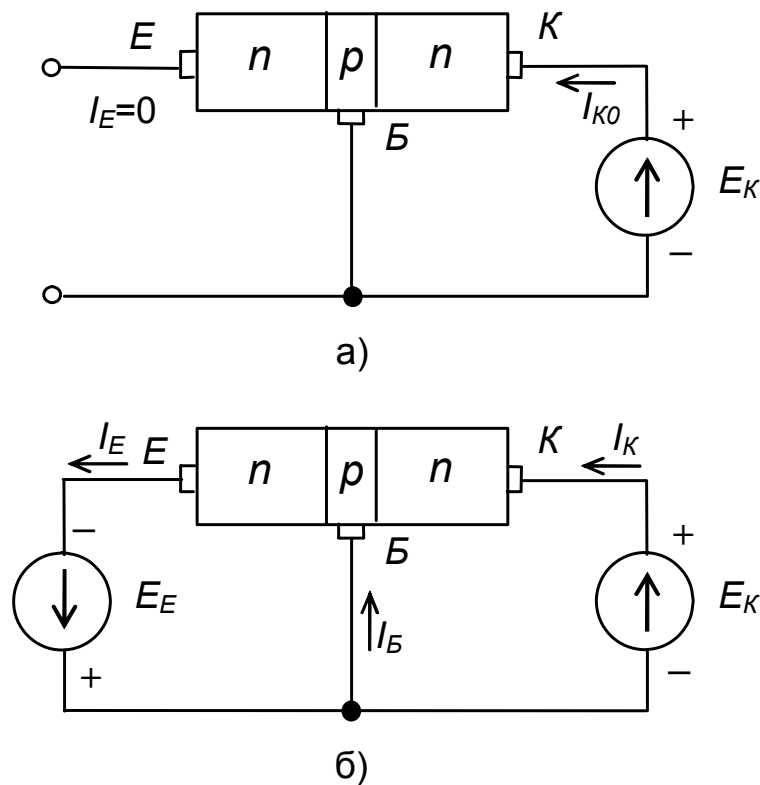


Рис. 1.6 - Спрощена схема вмикавання транзистора

Якщо підімкнути до транзистора також джерело E_E (між базою і емітером), як показано на рис. 1.6, б, емітерний перехід зміщується у прямому напрямку, і через нього до бази з емітера інжектується велика кількість носіїв (електронів) – струм I_E .

Через те, що у базі основних носіїв (дірок) набагато менше, ніж у емітері (електронів) і товщина бази незначна, тільки невелика частина електронів, що надходять з емітера в базу, буде встигати рекомбінувати з дірками і створювати струм бази I_B . Електрони, що залишилися, починають дифундувати у базі за всіма напрямками, у тому числі і до колекторного переходу. Потрапляючи в область колектора, вони підпадають під дію поля джерела E_K і спрямовуються до його позитивного електроду (вони тут є потоком основних носіїв заряду), створюючи струм колектора I_K .

Оскільки виходить, що струм бази (керуючого електрода) набагато менший струму колектора (струму силового кола), транзистор має підсилюючі властивості.

Струми електродів транзистора зв'язані співвідношенням:

$$I_E = I_B + I_K, \quad (1.1)$$

де I_E – струм емітера;

I_B – струм бази;

I_K – струм колектора.

Відношення струму колектора до струму емітера називається коефіцієнтом передачі струму емітера

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}. \quad (1.2)$$

Відношення колекторного струму до базового називається коефіцієнтом підсилення струму

$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{I_K}{I_E - I_K} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (1.3)$$

У сучасних транзисторів α знаходиться у межах від 0,9 до 0,99, а β – від 10 до 100 і більше.

Зв'язок струмів електродів біполярного транзистора і прикладених між його електродами напругами виражається статичними вольт-амперними характеристиками (ВАХ): вхідними і вихідними. Вид цих характеристик залежить від схеми вмикання транзистора.

Залежно від того, який з електродів транзистора є спільною точкою за змінним струмом для вхідного і вихідного кіл, можливі три способи вмикання: зі спільною базою (з СБ) – рис. 1.7, а; зі спільним емітером (з СЕ) – рис. 1.7, б; зі спільним колектором (з СК) – рис. 1.7, в.

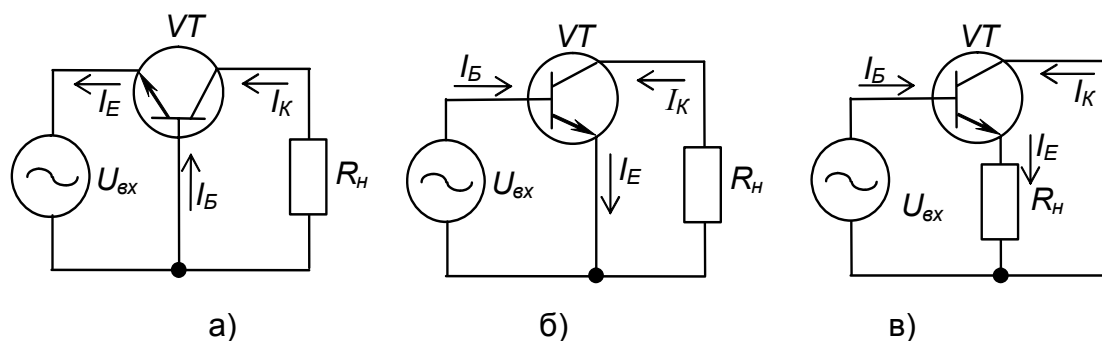


Рис. 1.7 - Схеми вмикання транзистора: а) з СБ; б) з СЕ; в) з СК

Найбільше поширення у підсилюючих каскадах та імпульсних пристроях одержала схема з СЕ як така, що дає найбільше підсилення за потужністю, забезпечуючи підсилення і за напругою, і за струмом.

Вхідні і вихідні ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СЕ, наведені на рис. 1.8.

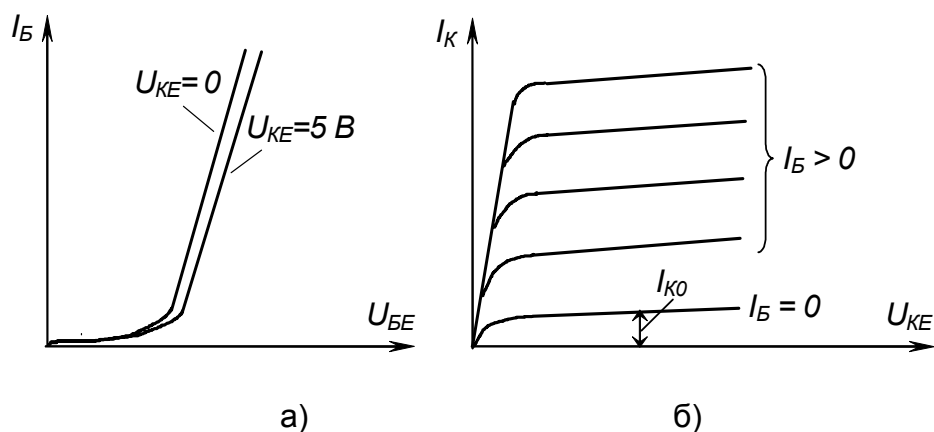


Рис. 1.8 – ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СЕ: а) вхідні; б) вихідні

Вхідні характеристики показують зв'язок між струмом бази I_B і напругою, прикладеною між емітером і базою U_{BE} .

Вхідна характеристика (рис. 1.8, а) при $U_{CE} = 0$ подібна до прямої гілки ВАХ діода. При $U_{CE} > 0$ вхідні характеристики дещо зміщуються вправо. Зменшення струму бази при цьому пояснюється зменшенням рекомбінацій у базі при її звуженні за рахунок розширення запираючого шару (зворотно зміщеного колекторного p - n переходу).

Вихідні статичні характеристики (рис. 1.8, б) показують зв'язок між струмом колектора I_K та напругою між колектором і емітером U_{KE} залежно від значення струму бази I_B . При $I_B = 0$ маємо ВАХ зворотно зміщеного колекторного p - n переходу. Зі збільшенням I_B струм колектора збільшується. При цьому його значення залежить від значення I_B і (десь при $U_{KE} > 1$ В) майже не залежить від значення U_{KE} , бо визначається тільки кількістю носіїв, що після інжекції із емітера в базу дифундували із бази в колектор.

На рис. 1.9, а показано лінію навантаження за постійним струмом (динамічну характеристику) і зони, що відповідають трьом характерним режимам роботи транзистора. Рівняння лінії навантаження має вигляд:

$$U_{KE} = E_K - I_K R_K,$$

де E_K – напруга живлення;

R_K – навантаження транзистора за постійним струмом.

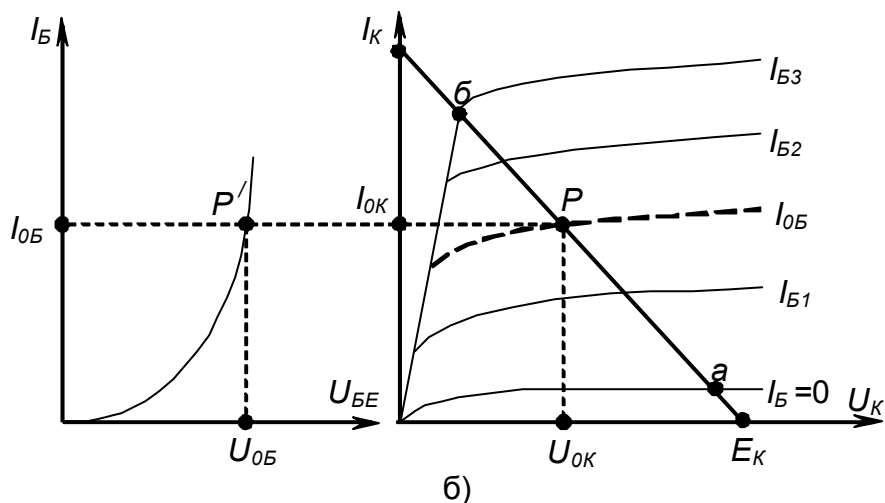
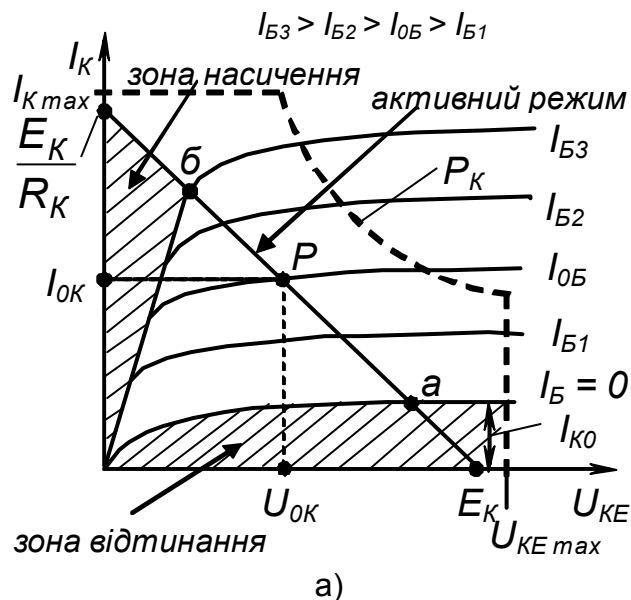


Рис. 1.9 – Побудова динамічної характеристики транзистора за постійним струмом і режими роботи транзистора

Лінія навантаження за постійним струмом проводиться через точки:

E_K , що відповідає $I_K = 0$ (режиму холостого ходу);

$I_K = E_K / R_K$, що відповідає $U_{KE} = 0$ (режиму короткого замикання).

Точка *а* відповідає режиму відтинання транзистора, за якого струм у колі навантаження дуже малий, внаслідок чого майже вся напруга джерела живлення прикладається до транзистора.

Точка *б* відповідає режиму насичення транзистора. У цьому режимі на транзисторі падає незначна напруга (до 0,1 - 0,3 В), що практично не залежить від зміни керуючого струму бази. Відповідно напруга і струм у колі навантаження залишаються незмінними.

Проміжок між точками *а* і *б* відповідає активному режиму.

Режими насичення і відтинання використовуються в ключових (імпульсних) схемах, а активний режим – у лінійних підсилювачах.

Так для підсилюючого каскаду, що працює у режимі класу А, перетин лінії навантаження з характеристикою, яка відповідає струмові бази $I_{0Б}$ (робоча точка P), визначає струм спокою $I_{0К}$. Цей струм протікає у колі колектора за відсутності сигналу змінної напруги у входньому колі і відповідає напрузі спокою за постійним струмом $U_{0К}$. Забезпечується режим спокою поданням у входнє коло транзистора напруги зміщення $U_{0Б}$ з-за чого протікає струм спокою бази $I_{0Б}$, як це показано на рис. 1.9, б.

5.2. Підсилюючі каскади на біполярних транзисторах

Електронним підсилювачем називається пристрій, призначений для підсилення потужності електричних сигналів без спотворення їхньої форми і частоти (для лінійного підсилювача).

Необхідність у підсилювачі виникає тоді, коли потужність джерела сигналу менша від потужності навантаження. У такому разі послідовно з навантаженням вмикають зовнішнє потужне джерело живлення і підсилюючий елемент. Джерело сигналу діє не безпосередньо на навантаження, а на вхід підсилюючого елемента і, змінюючи провідність останнього, забезпечує пропорційні входньому сигналу зміни струму у колі навантаження. У результаті в навантаженні виділяється необхідна потужність за рахунок енергії джерела живлення.

Таким чином, у самому загальному вигляді, для підсилення необхідна схема, наведена на рис. 1.10.

Вона складається з навантаження R_n , джерела живлення $E_{дж}$ та деякого гіпотетичного підсилюючого елемента $ПЕ$.

Малопотужна входна дія ($Vx. \text{ дія}$) змінює параметри $ПЕ$ так, що пропорційно їй змінюється потужність, яка виділяється в R_n за рахунок $E_{дж}$.

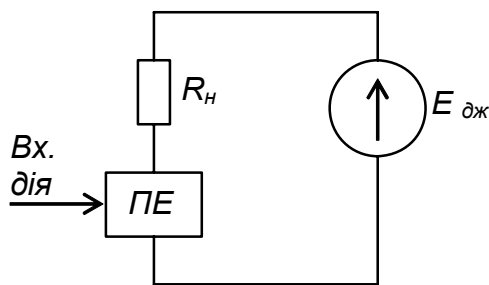


Рис. 1.10 – Узагальнена схема підсилення

Найпростіший вузол, що забезпечує підсилення електричних сигналів, називається підсилюючим каскадом.

Схема одиночного транзисторного підсилюючого каскаду зі спільним емітером (схема з СЕ), що забезпечує підсилення сигналів напруги змінного струму як за напругою, так і за струмом, наведена на рис. 1.11.

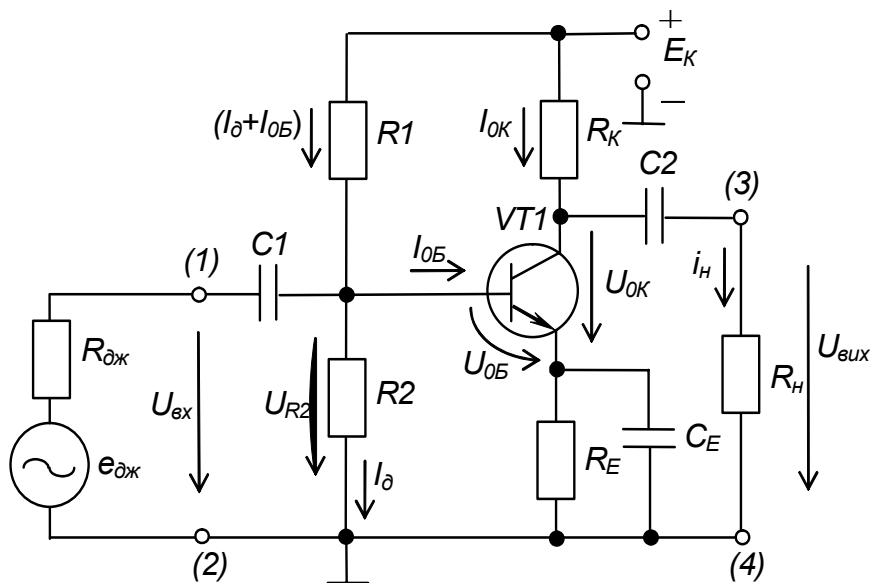


Рис. 1.11 - Підсилюючий каскад на біполярному транзисторі з СЕ

Силове коло каскаду складають джерело живлення E_K , резистор колекторного навантаження R_K і підсилюючий елемент – транзистор $VT1$.

Джерело підсилюваного сигналу підмикається до вхідного кола каскаду через конденсатор C_1 – точки (1) і (2).

Навантаження каскаду у даному випадку таке, що вимагає обов'язкового під'єднання одного з виводів до нульової точки (найчастіше таким навантаженням є наступний підсилюючий каскад). Тому воно підімкнене до виходу каскаду через конденсатор C_2 – точки (3) і (4).

Конденсатори розділяють кола за постійним струмом (постійний струм через конденсатор не протікає) і зв'язують їх за змінним. Вони виключають вплив постійної складової напруги джерела сигналу (якщо вона є) на вхідні кола каскаду і навпаки – напруги постійного струму вхідних кіл каскаду на джерело вхідного сигналу (C_1), а також вплив постійної складової вихідної напруги на навантаження (C_2).

Напруга на базі транзистора у режимі спокою (за відсутності вхідного сигналу змінної напруги) $U_{0Б}$ визначається дільником напруги R_1, R_2 і резистором R_E . Вона забезпечує струм бази $I_{0Б}$ і відповідно струм колектора $I_{0К}$ – режим за постійним струмом.

Для забезпечення температурної стабілізації режиму спокою каскаду у коло емітера включають резистор R_E . Він забезпечує негативний зворотний зв'язок за струмом дія якого полягає у наступному.

Оскільки напруга спокою бази

$$U_{0B} = U_{R2} - I_{0E}R_E, \quad (1.4)$$

де U_{R2} – напруга на резисторі R_2 ;

а струм спокою емітера

$$I_{0E} = I_{0K} + I_{0B},$$

то, наприклад, при збільшенні $I_{0E} \approx \beta I_{0B}$, за рахунок зростання коефіцієнта підсилення струму транзистора β під впливом зміни температури навколишнього середовища, збільшується I_{0E} . А значить збільшується і падіння напруги на R_E . За (1.4) це призводить до зменшення U_{0B} , що зменшує значення базового струму I_{0B} . У результаті цього I_{0K} наближається до попереднього значення.

Для усунення такого ж ефекту за змінним струмом (для виключення негативного зворотного зв'язку за підсилюваним сигналом) R_E за змінним струмом зашунтовано конденсатором C_E . Опір цього конденсатора на найнижчій частоті підсилюваного сигналу повинен бути набагато меншим за опір резистора R_E .

У режимі спокою струми бази і колектора постійні. Напруга спокою на колекторі транзистора

$$U_{0K} = E_K - I_{0K}(R_K + R_E). \quad (1.5)$$

При подачі вхідної змінної напруги на постійну складову струму I_{0B} накладається змінна складова, і струм бази стає пульсуючим. Відповідно пульсуючими стають струм колектора з амплітудою пульсацій I_{Km} і колекторна напруга з амплітудою U_{Km} , як показано на графіку рис. 1.12.

Змінна складова колекторної напруги через конденсатор C_2 передається на навантаження. Опір конденсатора C_2 на найнижчій частоті підсилюваного сигналу повинен бути набагато меншим за опори резистора R_K і навантаження R_n .

Оскільки вихідний опір каскаду практично дорівнює опорі резистора R_K , то зміни опорі навантаження R_n суттєво впливають на діюче значення вихідної напруги.

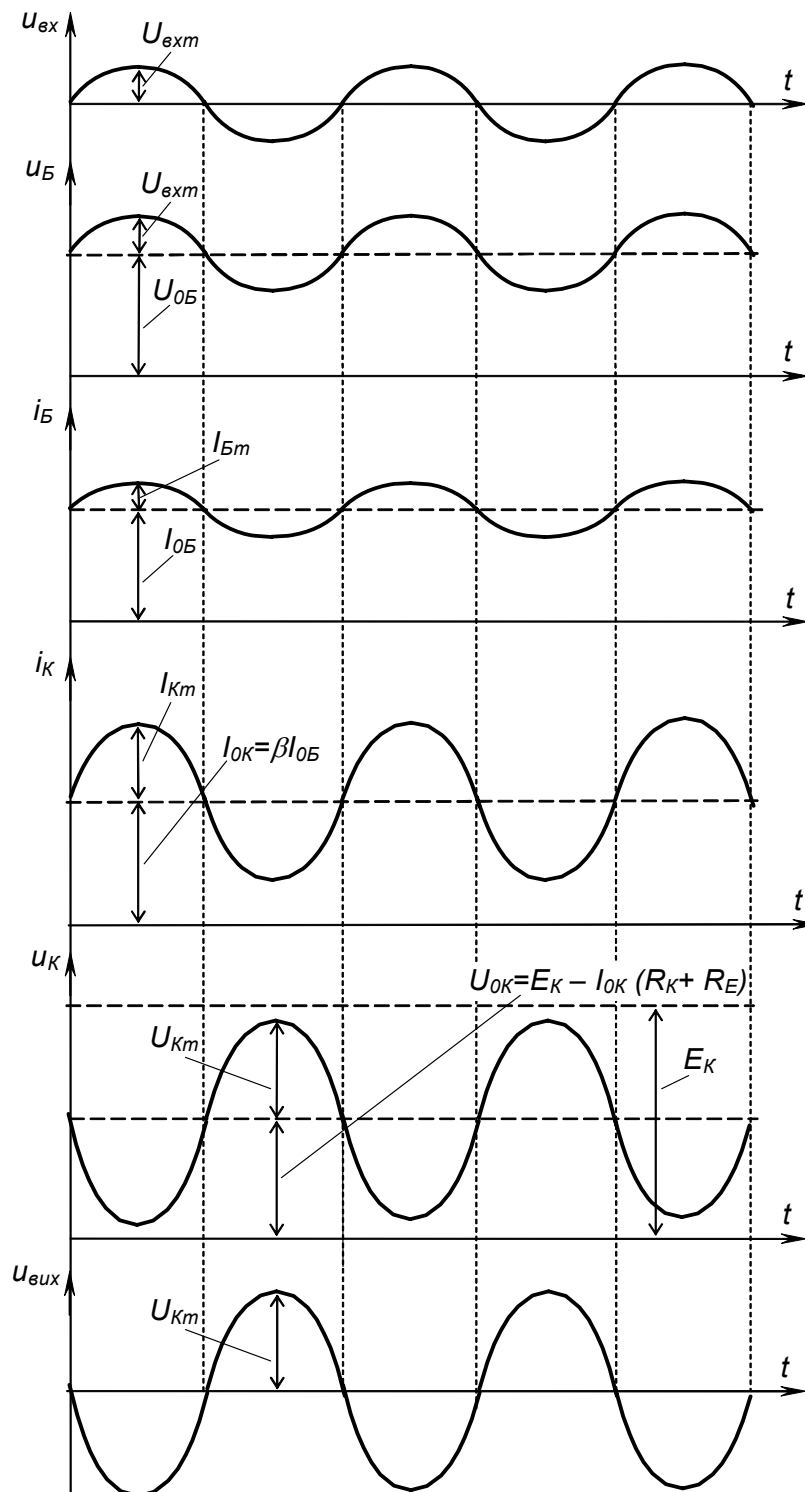


Рис. 1.12 - Часові діаграми роботи каскаду підсилення з СЕ

З графіка також видно, що, наприклад, зі збільшенням миттєвих значень струму колектора миттєві значення напруги на колекторі зменшуються. При цьому зміни струму колектора пропорційні змінам вхідної напруги, а фаза напруги на колекторі зміщена відносно фази вхідної напруги на 180° – кажуть, що підсилюючий каскад з СЕ інвертує вхідний сигнал.

Схема транзисторного одиночного підсилюючого каскаду зі спільним колектором (схема з СК), що забезпечує підсилення сигналів напруги змінного струму тільки за струмом, зображена на рис. 1.13.

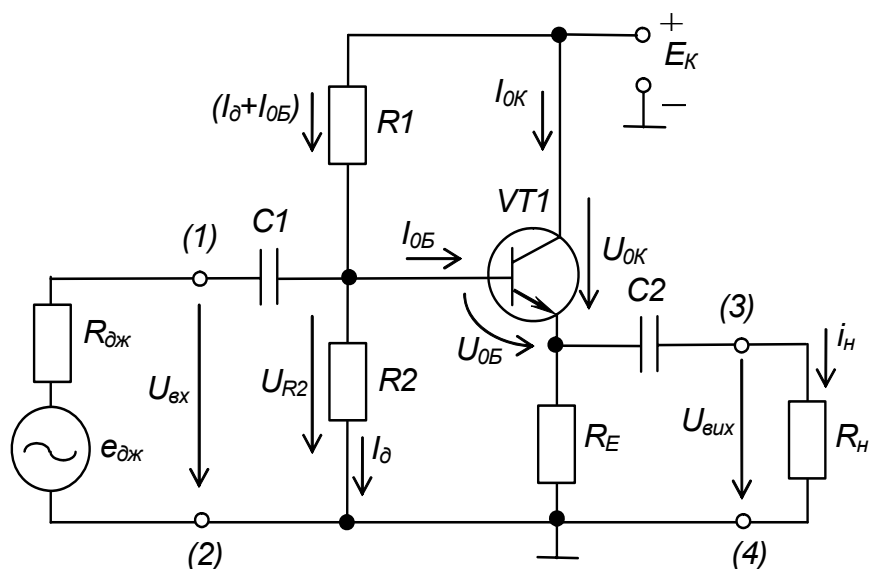


Рис. 1.13 – Підсилюючий каскад на біполярному транзисторі з СК (емітерний повторювач)

Призначення елементів R_1 , R_2 та C_1 і C_2 те ж саме, що і у схемі каскаду з СЕ. Опір R_E є навантаженням за постійним струмом і визначає положення динамічної характеристики каскаду.

Каскад з СК можна розглядати як каскад з СЕ при $R_K = 0$ і опором у колі емітера, не зашунтованим конденсатором C_E . У результаті в схемі діє стопроцентний послідовний негативний зворотний зв'язок за струмом, що знижує коефіцієнт підсилення за напругою до одиниці (реально він становить навіть менше одиниці) і водночас збільшує вхідний опір та зменшує вихідний.

Цей каскад не інвертує вхідний сигнал, бо зі збільшенням миттєвих значень струму колектора миттєві значення напруги на навантаженні, ввімкненому у коло емітера, також збільшуються. При цьому зміни струму колектора пропорційні змінам вхідної напруги, а фази вхідного і вихідного сигналів співпадають.

Через відсутність підсилення і інверсії цей каскад ще називають емітерним повторювачем напруги.

Вхідний опір каскаду з СК значно більший, ніж у схемі з СЕ, і приблизно може бути визначений за формулою

$$R_{ex} \approx (R_1 \parallel R_2) \parallel (R_E \parallel R_H) \cdot (1 + \beta). \quad (1.6)$$

Вихідний опір каскаду з СК становить

$$R_{вих} \approx R_E \parallel r_E, \quad (1.7)$$

де r_E – диференційний опір емітерного переходу, що для біполярних транзисторів складає від одиниць до десятків ом.

Вказані властивості каскаду з СК дозволяють використовувати його у тих випадках, коли необхідно узгодити джерело сигналу, що має великий внутрішній опір, з низькоомним навантаженням. При цьому забезпечується також підсилення сигналу за потужністю за рахунок підсилення каскадом з СК струму.

5.3. Будова і принцип дії польових транзисторів

Польовим називається транзистор, керований електричною напругою – полем (на відміну від біполярних транзисторів, у яких процес керування обов'язково супроводжується протіканням струму у колі керуючого електрода – бази). Розрізняють польові транзистори з керуючим p - n переходом і з ізолюваним затвором.

На рис. 1.14, а наведено конструкцію польового транзистора з керуючим p - n переходом.

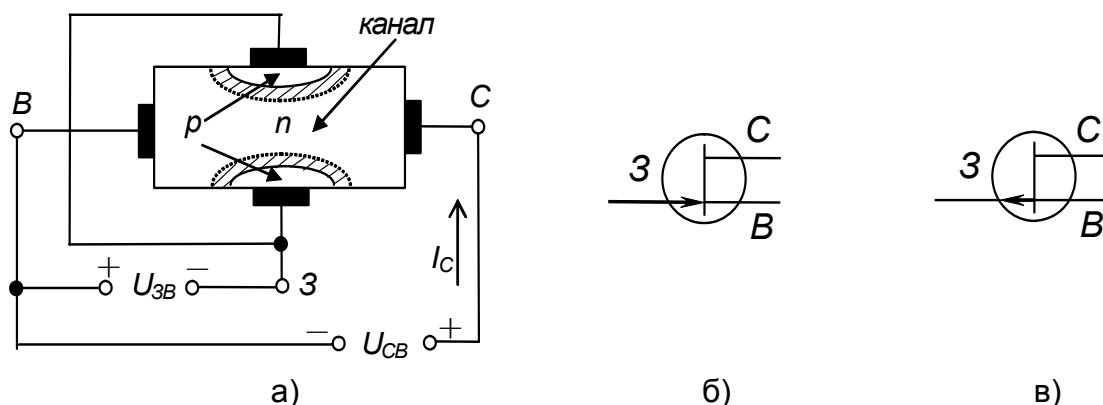


Рис. 1.14 – Структура та умовне позначення ПТ з керуючим p - n переходом з каналом n -типу (а і б) та умовне позначення ПТ з каналом p -типу (в)

Цей транзистор являє собою напівпровідникову пластинку з провідністю, наприклад, n -типу, на верхній і нижній гранях якої створюються шари з провідністю p -типу. Ці шари електрично з'єднують між собою, утворюючи єдиний електрод, що називається затвором (3).

Шар з провідністю n -типу, що розташований між шарами з провідністю p -типу, називається каналом.

Електрична ізоляція між каналом і затвором здійснюється за допомогою p - n переходів, що утворюються на межі напівпровідників з різною провідністю (використовується та властивість зони p - n переходу, що її опір безкінечний з-за відсутності у ній вільних носіїв заряду).

На торці напівпровідникової пластинки (каналу) наносять омічні контакти, що утворюють два інших електроди, до яких підмикається джерело живлення і навантаження. Контакт, до якого підмикається негативний полюс джерела, називається виток (В), а контакт, до якого підмикається позитивний полюс, сток (С).

Основні носії заряду (у даному випадку електрони) рухаються від витку до стоку (тече струм) через канал, поперечний переріз якого регулюється негативною відносно витку напругою на затворі $U_{зв}$, що зміщує p - n переходи у зворотному напрямку (розширюючи зони непровідності). Звуження каналу веде до збільшення його опору і зменшення значення струму, що тече через канал.

За напруги між стоком і витком $U_{св} = 0$ стінки каналу є екіпотенціальними поверхнями. При деякому $U_{зв} = U_{зв0}$, названому напругою відтинання, p - n переходи змикаються за всією довжиною каналу. У результаті стік і витік виявляються ізольованими один від одного. Значення напруги відтинання залежить від концентрації домішок у каналі і його розмірів.

У робочому режимі ($U_{св} > 0$) поверхні каналу не є екіпотенціальними, бо струм, що протікає через канал, створює падіння напруги, яка змінює ступінь зворотного зміщення p - n переходів за довжиною каналу. Біля витку напруга зсуву p - n переходів дорівнює $U_{зв}$, а біля стоку ($U_{зв} + U_{св}$).

Отже, перетин каналу буде змінним (зменшується від витку до стоку). Опір каналу при цьому носить нелінійний характер, тому і залежність $I_C = f(U_{св})$ також буде нелінійною. З підвищенням $U_{св}$ напруга на p - n переходах досягає значення напруги відтинання $U_{зв0} = (U_{зв} + U_{св})$ і вони поблизу стоку майже змикаються. При цьому диференціальний опір каналу різко зростає і подальше збільшення напруги $U_{св}$ не призводить до збільшення струму I_C (точка **a** на рис. 1.15). Тобто відбудеться насичення струму стоку (завдяки дії внутрішньої системи автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком).

Напруга $U_{CBH} = (U_{3B0} - U_{3B})$ називається напругою насичення. Її значення зі зменшенням напруги U_{3B} зростає, як видно з стокових (вихідних) ВАХ транзистора, наведених на рис. 1.15.

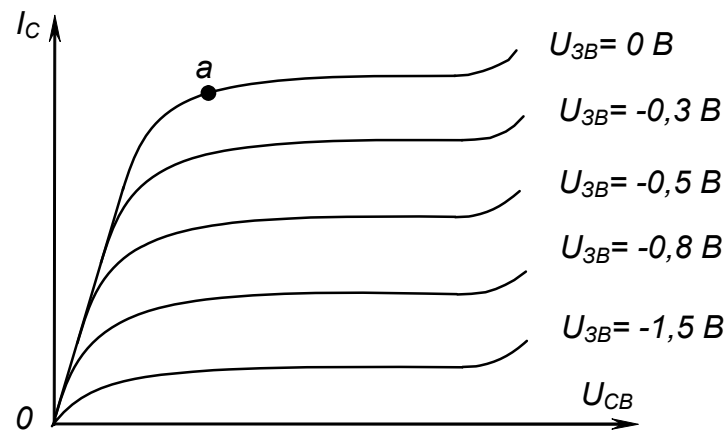


Рис. 1.15 - Стокові ВАХ ПТ з керуючим p - n переходом і каналом n -типу

Змінюючи напругу на затворі U_{3B} за фіксованої напруги U_{CB} , також можна керувати шириною каналу, а отже, значенням струму I_C , що видно зі стік-затворних ВАХ транзистора $I_C = f(U_{3B})$, наведених на рис. 1.16.

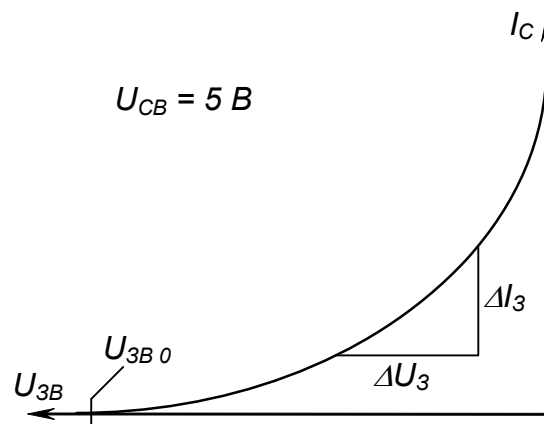


Рис. 1.16 – Стік-затворна ВАХ ПТ з керуючим p - n переходом і каналом n -типу

Більш широке застосування, особливо у складі ІМС, знаходять польові транзистори з ізольованим затвором, виконані за структурою метал-діелектрик (окисел)-напівпровідник – МДН (МОН)-транзистори.

Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом n -типу показана на рис. 1.17 а, а умовне зображення – на рис. 1.17, б, в.

При негативній чи рівній нулю напрузі U_{3B} струм стоку I_C дорівнює нулю, бо обидва p - n переходи транзистора ввімкнені зустрічно.

За позитивної напруги U_{3B} поверхня шару p -типу на межі напівпровідника і діелектрика збагачується електронами, що притягаються до позитивного електроду з глибини пластинки (знаходяться там за рахунок теплової генерації пар носіїв заряду). Виникає явище інверсії напівпровідника – тонкий шар n -типу утворюється на поверхні напівпровідника p -типу.

Таким чином обидві зони n -типу (витік і стік) виявляються електрично з'єднаними – утворюється наведений полем (індукований) канал, що має підвищену провідність і через який протікає струм.

Важливим параметрами польових транзисторів є крутизна стокової характеристики S і опір стоку r_C , що визначаються за ВАХ:

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}} \right|_{U_C = \text{const}} ; \quad (1.8)$$

$$r_C = \left. \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \right|_{U_{3B} = \text{const}} . \quad (1.9)$$

Польові транзистори знаходять широке застосування в пристроях промислової електроніки, що зумовлено їхніми високими входними опорами (до $10^{14} - 10^{17}$ Ом), малим рівнем шумів, малим опором каналу та ін.

5.4. Підсилюючі каскади на польових транзисторах

Принципи побудови підсилюючих каскадів на польових транзисторах ті самі, що і каскадів на біполярних транзисторах. Особливість полягає у тім, що польовий транзистор керується напругою, а не струмом. З цієї причини завдання режиму спокою в каскадах на польових транзисторах здійснюється подачею у вхідне коло каскаду постійної напруги відповідного значення і полярності.

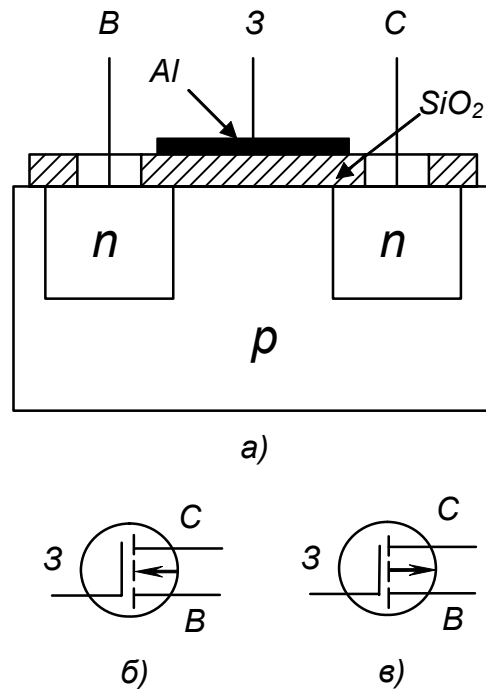


Рис. 1.17 – Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом n -типу (а) і умовні позначення таких транзисторів з каналами n -типу (б) та p -типу (в)

Польові транзистори так само, як і біполярні, мають три схеми вмикання. Відповідно до назв спільних електродів розрізняють каскади зі спільним стоком (СС), спільним витоком (СВ) та спільним затвором (СЗ).

Підсилюючий каскад з СВ на польовому транзисторі з керуючим p - n переходом і каналом n -типу зображений на рис. 1.18.

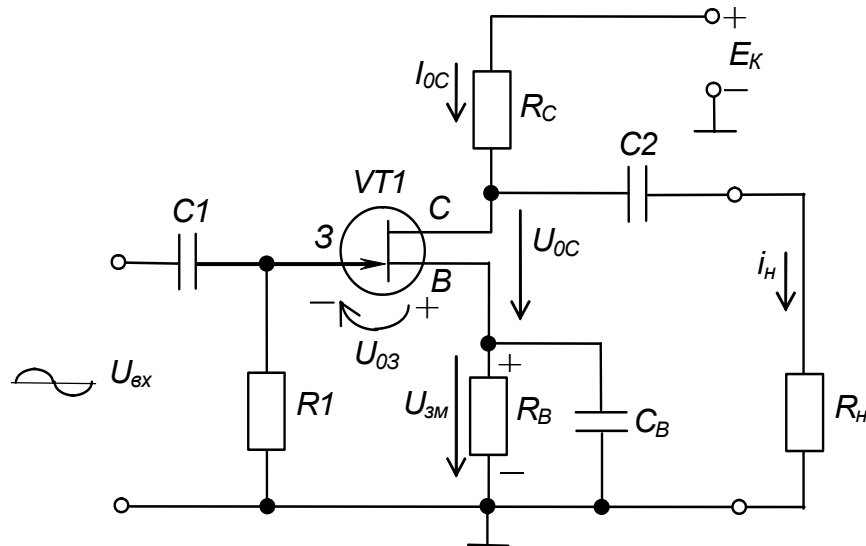


Рис. 1.18 – Підсилюючий каскад з СВ на польовому транзисторі з керуючим p - n переходом і каналом n -типу

Елементи R_L , R_C , R_B задають режим спокою каскаду.

Зверніть увагу: оскільки польові транзистори з керуючим p - n переходом за відсутності сигналу керування максимально відкриті, то зміщення транзистора забезпечується резистором R_B (необхідне значення напруги U_{03B} дорівнює $U_{зм}$) – автоматичне зміщення. Резистор R_L призначений для з'єднання затвору транзистора з нижнім виводом R_B і запобігання при цьому закорочування кола керування транзистора (з'єднання його затвору з нульовою точкою схеми). Опір резистора R_L вибирають якомога більшим, щоб забезпечити великий вхідний опір каскаду.

Резистор R_B також створює негативний зворотний зв'язок за постійним струмом, що слугує для стабілізації режиму спокою каскаду при зміні температури і розкиді параметрів транзистора. Конденсатор C_B призначений для виключення негативного зворотного зв'язку за змінним струмом (за підсилюваним сигналом).

Розділяючий конденсатор C_1 забезпечує зв'язок каскаду з джерелом вхідного сигналу напруги змінного струму. Навантаження підмикається через розділяючий конденсатор C_2 до стоку транзистора.

Каскад з СВ, так само як і каскад з СЕ на біполярному транзисторі, здійснює зсув фази підсилюваного сигналу на 180° (інвертує вхідний сигнал).

Схема підсилюючого каскаду з СС (витокового повторювача) зображена на рис. 1.19.

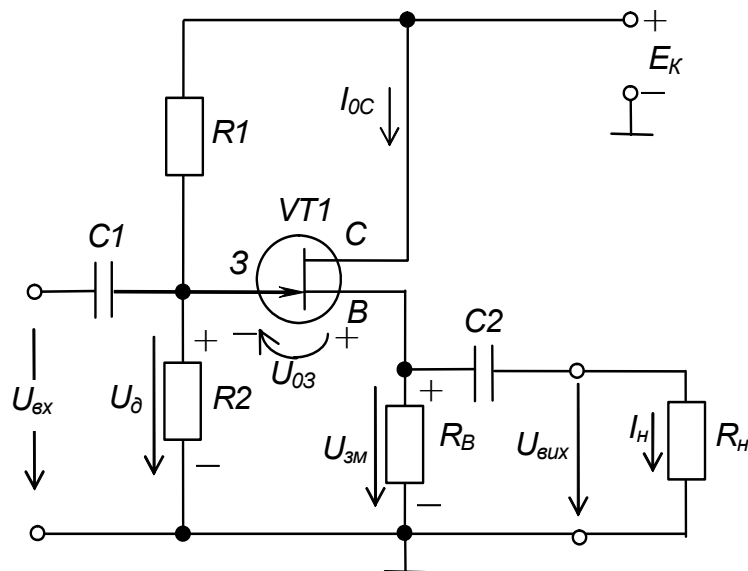


Рис. 1.19 - Підсилюючий каскад з СС на польовому транзисторі з керуючим p - n переходом і каналом n -типу

Будова каскадів на польових транзисторах з ізолюваним затвором аналогічна будові каскадів на біполярних транзисторах.

Контрольні запитання

- 1) Пояснить принцип роботи біполярного транзистора. Наведіть умовні позначення біполярних транзисторів різного типу.**
- 2) Пояснить принцип дії польового транзистора з керуючим p - n переходом.**
- 3) Пояснить принцип дії польового транзистора з ізолюваним затвором.**
- 4) За заданими викладачем значеннями E_K і R_K на сім'ї вихідних характеристик біполярного транзистора побудуйте лінію навантаження за постійним струмом і вкажіть режими роботи транзистора.**

5) За динамічною характеристикою підсилюючого каскаду з СЕ пояснити режими його роботи.

6) Наведіть схему підсилюючого каскаду з СЕ та поясніть призначення елементів.

7) Наведіть схему підсилюючого каскаду з СК та поясніть призначення елементів.

8) Поясніть зміну фази вихідного сигналу відносно вхідного у каскаді з СЕ і відсутність такого ефекту у каскаді з СК.

9) Поясніть вплив опору навантаження на значення вихідної напруги каскадів з СЕ і з СК.

10) Поясніть ефект підсилення транзистора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Колонтаєвський, Ю.П. Електроніка і мікросхемотехніка [Текст]: підручник для студентів вузів, 2-е вид. / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; за ред. докт. техн. наук, проф. А.Г. Соскова - К.: Каравела, 2009. - 416 с. - розділ 1. пп. 2.4, 2.5, розділ 3.

2. Колонтаєвський, Ю.П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум [Текст]: навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; за ред. докт. техн. наук, проф. А.Г. Соскова - К.: Каравела, 2004. - 432 с. (та інші видання цього посібника) – розділ 1, пп. 2.4, 2.5, розділ 3.

3. Руденко, В.С. Основы промышленной электроники [Текст]: учебник / В.И. Сенько, В.В. Трифонюк – К.: Вища школа, 1985, 400 с. - с. 24-45, 109-124.

4. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника [Текст]: учебник для вузов / Ю. С. Забродин – М.: Высш. школа, 496 с. - с. 42-73, 89-112.

5. Горбачов, Г.И. Промышленная электроника [Текст]: учебник для вузов / Г.И. Горбачов, Е.Е. Чаплыгин – М.: Энергоатомиздат, 1988, 320 с. - с. 20-33, 49-63, 71-76.

6. Красько А.С., Скачко К.Г. Промышленная электроника [Текст]: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А.С. Красько, К.Г. Скачко – Минск: Высшая школа, 1984, 208 с. - с. 26-51, 108-116.

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОКАСКАДНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ І ІНТЕГРАЛЬНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

1. МЕТА РОБОТИ

1) Вивчення параметрів і характеристик багатокаскадних підсилювачів змінного струму на біполярних транзисторах і інтегральних мікросхемах.

2) Дослідження впливу негативних зворотних зв'язків (НЗЗ) і ємності конденсаторів зв'язку на параметри і характеристики підсилювачів.

2. ОБЛАДНАННЯ

1) Стенд лабораторний № 2, 4.

2) Мультиметр ВР11.

3) Генератор сигналів ГЗ-34.

4) Осцилограф С1-93 (С1-83).

3. ЗМІСТ РОБОТИ

1) Дослідити властивості одиночного підсилюючого каскаду на біполярних транзисторах без НЗЗ і з НЗЗ за змінним струмом.

2) Дослідити властивості двокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах без НЗЗ і з комбінованим НЗЗ за різних значень ємності конденсаторів зв'язку.

3) Дослідити властивості двокаскадного підсилювача на інтегральних мікросхемах (ІМС).

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1. Ознайомитись з робочим місцем, устаткуванням і приладами.

4.2. Ввімкнути вимірювальні прилади та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановити у ліве положення.

4.3. Дослідження властивостей

одиночного підсилюючого каскаду на біполярних транзисторах

4.3.1. Дослідження одиночного підсилюючого каскаду з СЕ у режимі класу А виконувати за допомогою схеми, зображеної на рис. 2.1 (верхня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

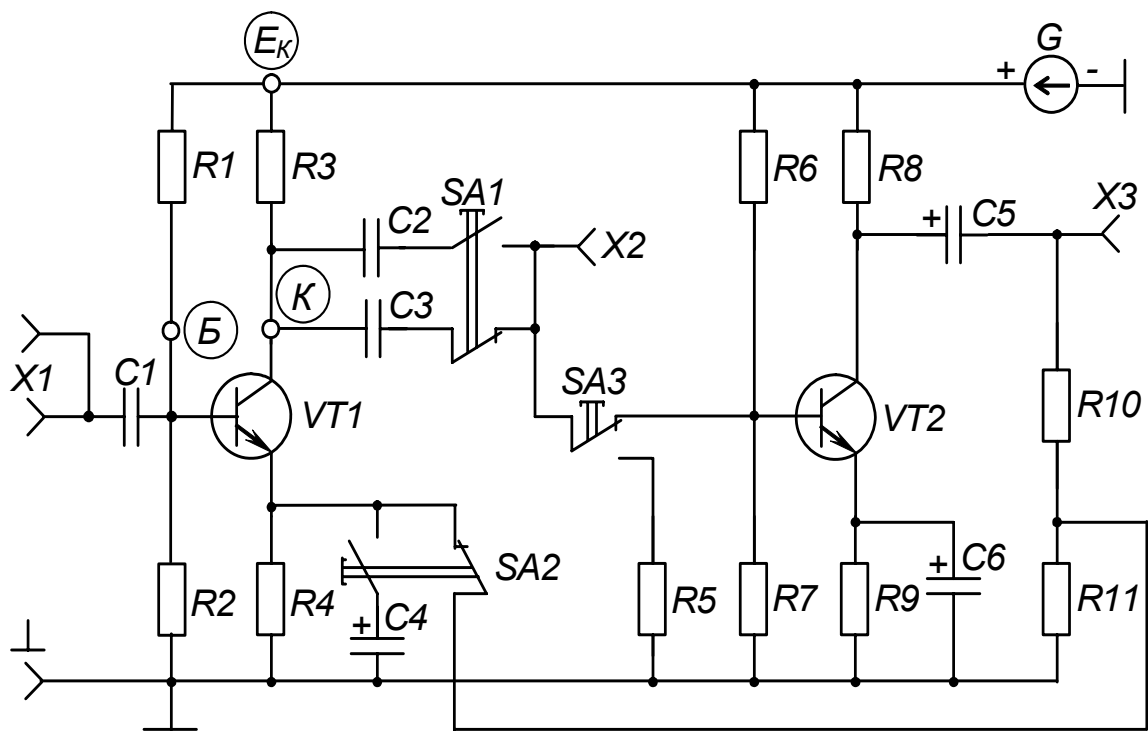


Рис. 2.1– Схема для дослідження підсилювачів на біполярних транзисторах

Задати частоту вхідного сигналу підсилювача рівною 1000 Гц, для чого:

1) підімкнути вихід генератора сигналів ГЗ-34 до входу підсилювача (до клем $X1$ і „ \perp ”);

2) перемикач $SA3$ встановити у натиснуте положення – до виходу першого каскаду підсилювача підімкнеться навантаження R_5 (світиться сигнальна лампа „ I ”);

3) перемикач $SA1$ встановити у ненатиснуте положення (світиться лампа „ $C3$ ”), а $SA2$ – у натиснуте (відключається НЗЗ);

4) встановити межу вимірювання мультиметра „ V_{\sim} ”, „2” і підімкнути його до виходу першого каскаду підсилювача (клем $X2$ і „ \perp ”);

5) встановити на світній шкалі генератора сигналів межу „100 mV, 300 mV, 1V, 0 dB”; перемикач „Пределы шкал. Ослабление” встановити у положення „ATT.”; ручку „Рег. выхода” встановити у граничне ліве положення; перемикач масштабу частоти „x1, x10, x100” встановити у положення „x10”; на шкалі частоти ручкою плавного регулювання частоти генератора виставити значення „100”.

4.3.2. Зняти амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ однокаскадного підсилювача без НЗЗ, для чого, обертаючи за годинниковою стрілкою ручку генератора “Рег. вихода”, задавати необхідні значення вхідної напруги підсилювача за вольтметром генератора (переводячи в міру необхідності перемикач світної шкали генератора у наступні положення за годинниковою стрілкою) і фіксувати відповідні значення вихідної напруги підсилювача за мультиметром.

Результати вимірів занести у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Результати зняття даних для побудови амплітудної характеристики за $f_{вх} = 1000$ Гц

$U_{вх}$, мВ		10	20	40	60	80	100	150	200	250	300	350	400	Вид підсилювача
$U_{вих}$, В	без НЗЗ													Однокаскадний транзисторний
	з НЗЗ													
	без НЗЗ													*) Двокаскадний транзисторний
	з НЗЗ													
	-													**) Двокаскадний на ІМС

*) Заповнюється при виконанні пп. 4.4;

**) Заповнюється при виконанні пп. 4.5.

4.3.3. Зняти амплітудну характеристику однокаскадного підсилювача з НЗЗ за струмом, для чого перемикач SA2 встановити у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа „ООС”).

Далі методика виконання та ж, що й у пп. 4.3.2.

4.3.4. Зняти осцилограми роботи одиночного підсилюючого каскаду за наявності вхідного сигналу і у режимі спокою (без вхідного сигналу).

4.3.4.1. Задати значення напруги вхідного сигналу підсилювача рівним 100 мВ (відповідно до методики, викладеної у пп. 4.3.2).

4.3.4.2. Підімкнути вимірювальний кабель першого каналу осцилографа до клем $X1$ і „ \perp ” та зарисувати осцилограму вхідної напруги каскаду $u_{вх}$.

4.3.4.3. Підімкнути вимірювальний кабель другого каналу осцилографа нульовим провідником до клем „ \perp ”. Сигнальний провідник підмикати по черзі до клем (B) , (K) та $X2$ і, керуючись даними рис. 1.12, зарисовувати осцилограми напруг на базі та колекторі транзистора $VT1$ і на навантаженні каскаду за наявності вхідного сигналу: u_B , u_K та $u_{вих}$ відповідно, та за відсутності вхідного сигналу (для чого треба відімкнути генератор від клем $X1$): U_{0B} та U_{0K} . Також зарисувати осцилограму напруги на клемі (E_K) .

Збільшити значення вхідної напруги підсилювача до появи помітних викривлень форми вихідного сигналу. Зарисовувати осцилограми напруг на базі та колекторі транзистора $VT1$ і на навантаженні каскаду: u_B , u_K та $u_{вих}$.

При виконанні дослідів органи керування осцилографа встановлювати у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення.

4.4. Дослідження властивостей

двокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах

4.4.1. Дослідження виконувати за методикою, викладеною у пп. 4.3.1, тільки перемикач $SA3$ необхідно встановити у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа „2”), а мультиметр підімкнути до виходу другого каскаду – клем $X3$ і „ \perp ”.

4.4.2. Зняти амплітудну характеристику двокаскадного підсилювача без НЗЗ за методикою пп. 4.3.2.

4.4.3. Зняти амплітудну характеристику двокаскадного підсилювача з комбінованою НЗЗ (за струмом і за напругою) за методикою пп. 4.3.3.

4.4.4. Зняти амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) підсилювача $U_{вих} = f(U_{вх})$:

1) без НЗЗ (SA2 у натиснутому положенні) і при ємності конденсатора зв'язку $C_p = C_2 = 0,5$ мкФ (SA1 у натиснутому положенні);

2) без НЗЗ і при ємності $C_p = C_3 = 20$ мкФ (SA1 у ненатиснутому положенні);

3) з НЗЗ (SA2 у ненатиснутому положенні) і при $C_p = C_2 = 0,5$ мкФ (SA1 у натиснутому положенні);

4) з НЗЗ і при $C_p = C_3 = 20$ мкФ (SA1 у ненатиснутому положенні).

Значення напруги вхідного сигналу підсилювача ручкою „Рег. вихода” генератора задати рівним 50 мВ (або 70, 100 – на вибір) згідно до методики, викладеної у пп. 4.3.1.

Необхідні значення частоти вхідного сигналу підсилювача задавати ручкою плавного регулювання частоти генератора за шкалою і за допомогою перемикача масштабу частоти „x1, x10, x100”.

Результати вимірів занести у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Результати зняття даних для побудови АЧХ за $U_{ex} = \text{const}$

f_{ex} , Гц			50	100	200	500	10^3	2×10^3	5×10^3	10×10^3	15×10^3	20×10^3	Вид підсилювача
U_{ex} , В	без НЗЗ	C2*)											Дво-каскадний транзисторний
		C3*)											
	з НЗЗ	C2											
		C3											
	-	-											**) Дво-каскадний на ІМС

*) $C_2 = 0,5$ мкФ; $C_3 = 20$ мкФ.

**) Заповнюється при виконанні пп. 4.5

4.5. Дослідження двокаскадного підсилювача на ІМС

4.5.1. Дослідження властивостей підсилювача на ІМС робити за схемою, наведеною на рис. 2.2 (нижня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

Вихід генератора підімкнути до входу підсилювача на ІМС – до клем Х1 і „⊥”.

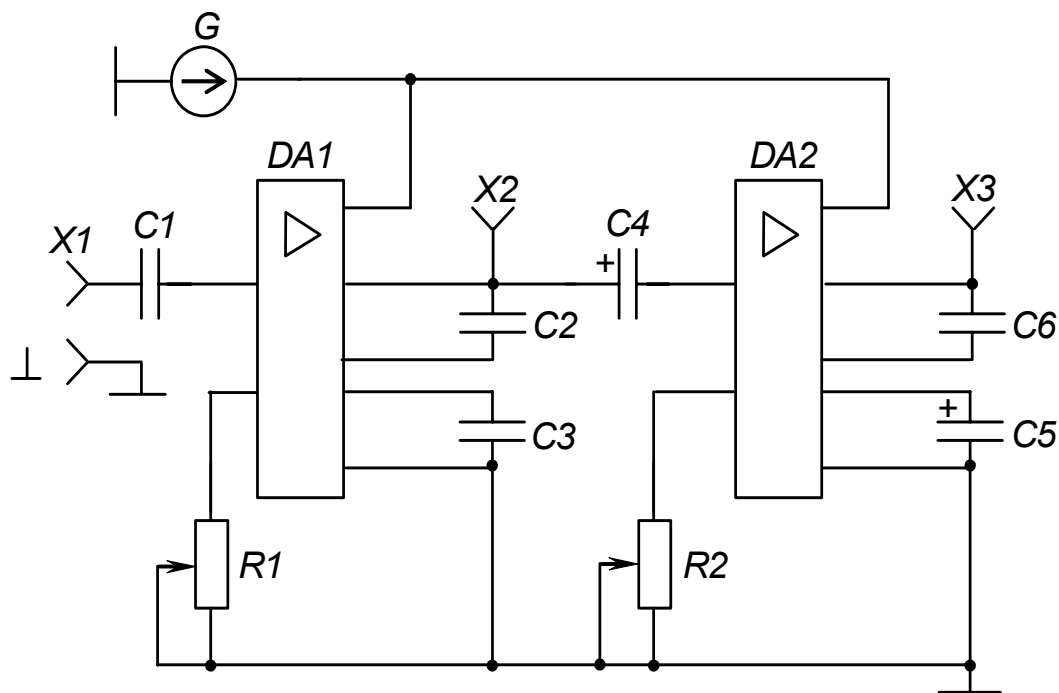


Рис. 2.2– Схема для дослідження підсилювача на ІМС

Задати частоту вхідного сигналу підсилювача рівною 1000 Гц відповідно до методики, викладеної у пп. 4.3.1.

Ручкою „Рег. вихода” задати значення вхідної напруги підсилювача рівною 10 мВ.

Підімкнути мультиметр до виходу першого каскаду підсилювача (клеми X2 і „⊥”) і ручкою резистора R_1 встановити значення вихідної напруги каскаду 50 мВ (60, 70 – на вибір), тобто задати коефіцієнт підсилення рівним 5 (6, 7).

Підімкнути мультиметр до виходу другого каскаду підсилювача (клеми X3 і „⊥”) і ручкою резистора R_2 встановити значення вихідної напруги підсилювача 500 мВ (600, 700), тобто задати коефіцієнт підсилення другого каскаду рівним 10, а всього підсилювача – 50 (60, 70).

4.5.2. Зняти амплітудну характеристику $U_{вих} = f(U_{вх})$ двокаскадного підсилювача на ІМС за методикою пп. 4.3.2.

4.5.3. Встановити значення напруги вхідного сигналу підсилювача рівним 30 мВ (40, 50 – на вибір) за методикою пп. 4.4.4.

4.5.4. Зняти залежність $U_{вих} = f(U_{вх})$ двокаскадного підсилювача на ІМС, задаючи необхідні значення частоти за методикою пп. 4.4.4. Результати занести у табл. 2.2.

4.6. Вимкнути прилади і живлення стенда лабораторного.

Навести порядок на робочому місці.

4.7. Обробка результатів експериментів

4.7.1. За даними табл. 2.1 у одній системі координат побудувати графіки амплітудних характеристик. Зробити висновки про характер кривих.

4.7.2. За амплітудними характеристиками визначити динамічний діапазон і коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}$ кожного підсилювача.

Зробити висновок про вплив НЗЗ на ці параметри.

4.7.3. Осцилограми роботи однокаскадного підсилюючого каскаду з СЕ у режимі класу А розмістити одну під одною згідно з рис 1.12.

4.7.4. За даними табл. 2.2 розрахувати значення K_U і занести у табл. 2.3.

4.7.5. За даними табл. 2.2 побудувати у одній системі координат АЧХ підсилювачів $K_U = f(\lg f_{вх})$. Зробити висновки про характер кривих.

Таблиця 2.3 - Результати розрахунку значень коефіцієнта підсилення для побудови АЧХ

$f_{вх}, \text{Гц}$			50	100	200	500	10^3	2×10^3	5×10^3	10×10^3	15×10^3	20×10^3	Вид підсилювача
$K_U = U_{вих} / U_{вх}$	без НЗЗ	$C_2^*)$											Двокаскадний транзисторний
		$C_3^*)$											
	з НЗЗ	C2											
		C3											
	-	-											Двокаскадний на ІМС

4.7.6. За АЧХ визначити смугу пропускання кожного підсилювача. Зробити висновок про вплив НЗЗ і ємності конденсатора зв'язку на характеристики підсилювача.

5. ПОЯСНЕННЯ ДО РОБОТИ

Як вже зазначалося у пп. 5.2 лабораторної роботи №1, підсилювач – це пристрій, у якому порівняно малопотужний вхідний сигнал керує передачею значно більшої потужності від джерела живлення в навантаження. Збільшення потужності вхідного сигналу для лінійного підсилювача повинне забезпечуватися без викривлення форми і змін частотного складу.

З транзисторних підсилювачів найбільше поширення знайшли переважно виконані за схемою з СЕ. У наш час поширені підсилювачі на ІМС.

Найпростіший підсилюючий вузол називають підсилюючим каскадом.

Найважливішим параметром підсилювача є коефіцієнт підсилення – відношення напруги (струму, потужності) на виході підсилювача до напруги (струму, потужності) на вході (відповідно, коефіцієнт підсилення за напругою K_U , за струмом K_I , за потужністю K_P). Він показує ступінь збільшення вихідного сигналу у порівнянні з вхідним. У ідеального лінійного підсилювача коефіцієнт підсилення повинен мати постійне значення незалежно від значень напруги і частоти вхідного сигналу.

Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення ввімкнутих послідовно каскадів.

Основними характеристиками підсилювача є амплітудна й амплітудно-частотна характеристики.

Амплітудна характеристика показує залежність $U_{вих} = f(U_{вх})$ на деякій постійній частоті.

У реального підсилювача ця характеристика має вигляд, наведений на рис. 2.3.

У робочому діапазоні значень напруги від $U_{вх\ min}$ до $U_{вх\ max}$ характеристика лінійна.

У зоні від 0 до $U_{вх\ min}$ напруга на виході визначається власними шумами підсилювача, викликаними, наприклад, пульсаціями напруги живлення, неоднорідністю структури елементів. Шуми глушать корисний сигнал.

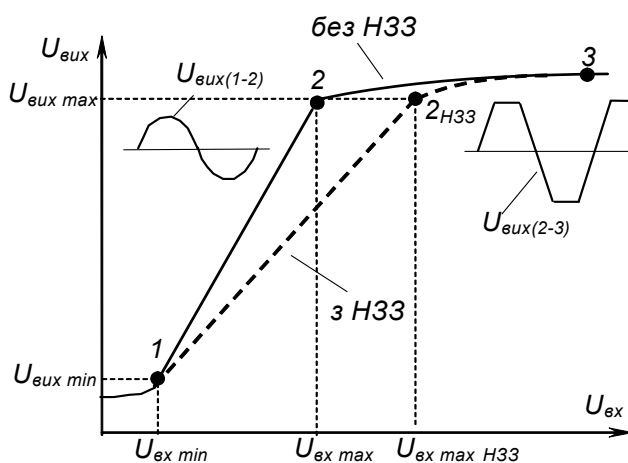


Рис. 2.3 - Амплітудна характеристика підсилювача $U_{вих} = f(U_{вх})$

При вхідних напругах більших за $U_{вх\ max}$ пропорційність між $U_{вих}$ і $U_{вх}$ порушується через порушення пропорційної залежності між вхідним і вихідним струмами транзистора (транзистор починає заходити у режими насичення та відтинання). При цьому виникають викривлення вихідного сигналу, що називаються нелінійними. Підсилювач входить у режим насичення, коли вихідна напруга не залежить від вхідної. Зауважимо, що необхідно розрізняти режими насичення транзистора (за постійним струмом) і режим насичення підсилювача (за змінним струмом).

Здатність підсилювача підсилювати мінімальне і максимальне значення напруги з дотриманням їхньої пропорційної залежності визначається динамічним діапазоном:

$$D = \frac{U_{вх\ макс}}{U_{вх\ мин}}. \quad (2.1)$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) показує залежність модуля коефіцієнта підсилення підсилювача від частоти. Тобто показує, як підсилюються гармонійні складові складного сигналу. Вид АЧХ наведено на рис. 2.4.

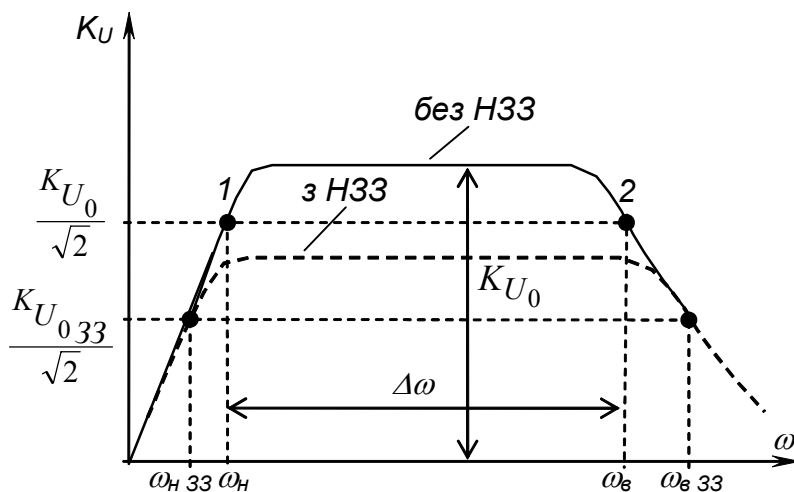


Рис. 2.4 - АЧХ підсилювача з резистивно-ємнісними зв'язками

Неоднаковість підсилення гармонійних складових веде до частотних викривлень, через які форма складного вихідного сигналу відрізняється від форми вхідного.

Причиною частотних викривлень є елементи підсилювача, опір яких залежить від частоти (ємності, індуктивності). Як зосереджені – елементи схеми (на низьких частотах), так і розосереджені – паразитні (на вищих частотах).

За АЧХ можна визначити смугу пропускання підсилювача

$$\Delta f = f_v - f_n, \quad (2.2)$$

що являє собою діапазон частот, у якому коефіцієнт підсилення не відрізняється від максимального K_{U0} більш, ніж у $\sqrt{2}$ раз:

$$K_U \geq \frac{K_{U0}}{\sqrt{2}}. \quad (2.3)$$

Для підсилення сигналів змінного струму застосовують підсилювачі з резистивно-ємнісними міжкаскадними зв'язками. Схема такого двокаскадного підсилювача наведена на рис. 2.5.

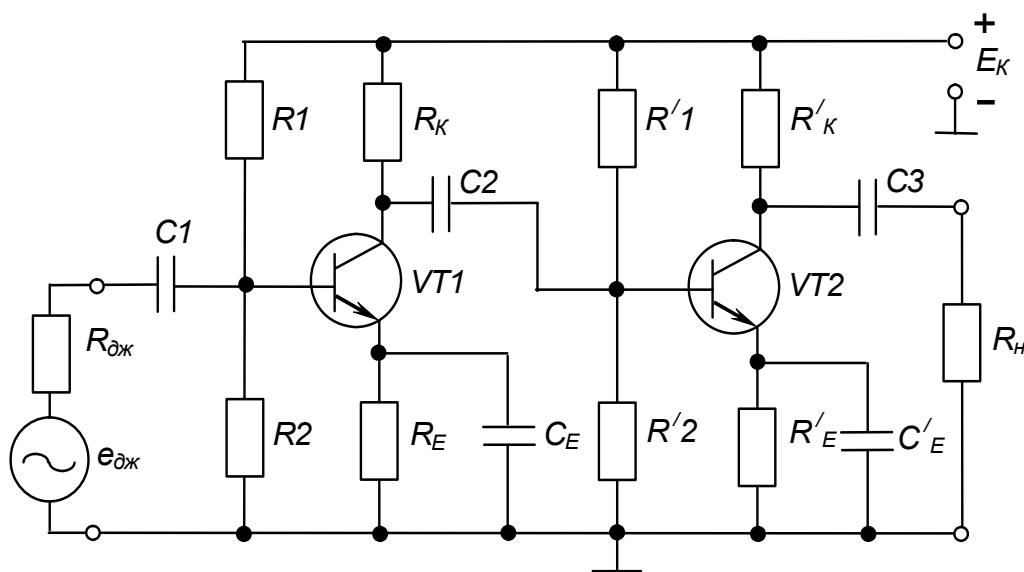


Рис. 2.5 - Двокаскадний підсилювач з резистивно-ємнісними зв'язками

Наявність конденсаторів у якості елементів міжкаскадного зв'язку (C_2), а також зв'язку з джерелом сигналу (C_1) і навантаженням (C_3) робить режими роботи каскадів за постійним струмом взаємозалежними, а також виключає їхній вплив на роботу джерела сигналу і навантаження (див. U_{0K} на рис. 1.9).

У той же час наявність цих конденсаторів веде до зниження коефіцієнта підсилення на нижчих частотах через те, що опір конденсаторів $X_C = 1/2\pi fC$ зі зниженням частоти збільшується, а значить зростає падіння напруги на них і, у результаті, менша частка змінної напруги передається у навантаження (або наступний каскад). В області середніх і вищих частот вплив цих конденсаторів незначний.

На вищих частотах паразитні ємності (ємності монтажу і міжелектродні ємності у транзисторах та інших елементах) призводять до шунтування корисного сигналу (замикання частини струму корисного сигналу на загальний провід), а також до виникнення паразитних НЗЗ (наприклад, через ємність колектор-база транзисторів). Все це призводить до зниження коефіцієнта підсилення. Тут також позначається залежність коефіцієнта підсилення транзисторів за струмом β від частоти. Отже необхідно вибирати транзистори з граничною частотою підсилення, що значно перевищує верхню частоту сигналу.

Каскад підсилювача, як правило, має кола, за допомогою яких частина енергії сигналу передається з виходу каскаду на його вхід або на вхід одного з попередніх каскадів – кола зворотного зв'язку.

Ми вже знайомі з НЗЗ за постійним струмом (див. пп. 5.2 у лабораторній роботі №1), що застосовується для температурної стабілізації режиму спокою підсилюючого каскаду.

До речі, наявність конденсаторів C_3 і C_4 , що шунтують резистори R_4 і R_8 , на нижчих частотах веде до виникнення НЗЗ за змінним струмом і відповідно до зниження коефіцієнта підсилення.

У роботі досліджується НЗЗ за змінним струмом, що забезпечується відмиканням конденсатора C_4 (див. рис. 2.1), і за напругою – подачею частини вихідної напруги з дільника R_{10} , R_{11} у коло емітера $VT1$ у протифазі до вхідної напруги (див. рис. 2.1).

НЗЗ веде до зниження коефіцієнта підсилення підсилювача:

$$K_{U33} = \frac{K_U}{1 + K_U \cdot X}, \quad (2.4)$$

де $X = U_{33} / U_{вих}$ – коефіцієнт передачі кола НЗЗ, що показує, яка частина вихідної напруги подається на вхід підсилювача.

Введення НЗЗ, знижуючи коефіцієнт підсилення, у той же час збільшує динамічний і частотний діапазони підсилювача (що видно з його амплітудних і амплітудно-частотних характеристик) та покращує інші його параметри. Так, наприклад, у $(1 + K_U X)$ раз збільшується вхідний і зменшується вихідний опори підсилювача.

При великому значенні K_U і глибокому НЗЗ, як впливає з (2.4), якщо $K_U \rightarrow \infty$, K_{U33} наближається до значення $1/X$. Тобто він не залежить від

фактичного значення K_U і його змін з коливаннями температури та під дією інших факторів. Отже НЗЗ підвищує стабільність підсилювача.

Наявність позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ), коли сигнал зворотного зв'язку знаходиться у фазі з вхідним, навпроти, погіршує характеристики підсилювача. Виникнення паразитних ПЗЗ через загальні кола живлення каскадів, паразитні ємності й індуктивності може також призводити до самозбудження підсилювача, коли він переходить у режим генерації сигналу деякої частоти.

Виконання підсилювачів у вигляді ІМС, поряд із зменшенням габаритів, значно підвищує їхню якість у порівнянні з підсилювачами на дискретних компонентах. Зокрема, це відбувається за рахунок значного зниження паразитних зворотних зв'язків. Інтегральна технологія дозволяє істотно поліпшити якість і надійність електронних підсилювачів шляхом забезпечення при їхньому проектуванні великого запасу параметрів: так званої функціональної надлишковості.

Контрольні запитання

- 1) Вкажіть області застосування підсилювачів змінного струму, їхні основні параметри й характеристики.**
- 2) Поясніть причину появи нелінійних викривлень.**
- 3) Вкажіть, у яких режимах працює транзистор підсилювача у його режимах, що відповідають різним ділянкам амплітудної характеристики.**
- 4) Поясніть причини виникнення частотних викривлень в області нижчих частот.**
- 5) Поясніть причини виникнення частотних викривлень в області вищих частот.**
- 6) Поясніть, що таке динамічний діапазон і смуга пропускання підсилювача та як впливає НЗЗ на ці параметри.**
- 7) Поясніть призначення конденсаторів міжкаскадного зв'язку і їхній вплив на АЧХ підсилювача.**

8) Поясніть, як забезпечується температурна стабілізація режиму спокою досліджуваних підсилюючих каскадів і як впливають елементи температурної стабілізації на АЧХ.

9) Наведіть схему двокаскадного підсилювача низької частоти, поясніть призначення елементів, покажіть шлях протікання струмів (постійних і змінних).

10) Поясніть призначення НЗЗ, що застосовані у досліджуваних підсилювачах.

11) Вкажіть переваги застосування підсилювачів у інтегральному виконанні (у вигляді ІМС).

ЛІТЕРАТУРА

1. Колонтаєвський, Ю.П. Електроніка і мікросхемотехніка [Текст]: підручник для студентів вузів, 2-е вид. / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; за ред. докт. техн. наук, проф. А.Г. Соскова - К.: Каравела, 2009. - 416 с. - розділ 3.

2. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб. / За ред. А.Г. Соскова. 2-е вид. - К.: Каравела, 2004. - 432 с. (та інші видання цього посібника) – розділ 3.

3. Руденко, В.С. Основы промышленной электроники [Текст]: учебник / В.И. Сенько, В.В. Трифонюк – К.: Вища школа, 1985, 400 с. - с. 97-117, 123-128.

4. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника [Текст]: учебник для вузов / Ю. С. Забродин – М.: Высш. школа, 496 с. - с. 87-104, 112-120, 131-136.

5. Горбачов, Г.И. Промышленная электроника [Текст]: учебник для вузов / Г.И. Горбачов, Е.Е. Чаплыгин – М.: Энергоатомиздат, 1988, 320 с. - с. 49-58, 89-92, 95-98.

6. Красько А.С., Скачко К.Г. Промышленная электроника [Текст]: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А.С. Красько, К.Г. Скачко – Минск: Высшая школа, 1984, 208 с. - с. 99-124.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ І ЇХНІХ ТИПОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ

1. МЕТА РОБОТИ

- 1) Дослідження властивостей і характеристик операційних підсилювачів (ОП).
- 2) Дослідження типових аналогових пристроїв на ОП.

2. ОБЛАДНАННЯ

- 1) Стенд лабораторний № 1, 3.
- 2) Вольтметр цифровий В7-27.
- 3) Мультиметр ВР-11.
- 4) Осцилограф С1-93 (С1-83).

3. ЗМІСТ РОБОТИ

- 1) Дослідити властивості і передатні характеристики ОП.
- 2) Дослідити будову і роботу типових аналогових пристроїв на ОП: інвертуючого підсилювача, неінвертуючого підсилювача, підсилювача-віднімача, інвертуючого інтегратора, диференціатора.

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1. Ознайомитись з робочим місцем і приладами.
 - 4.2. Ввімкнути прилади і живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда лабораторного (між мнемосхемами) встановити у праве положення.
 - 4.3. Дослідження властивостей і характеристик ОП
 - 4.3.1. Дослідження властивостей і характеристик ОП робити за допомогою схеми, приведеної на рис. 3.1 (верхня мнемосхема на правій половині стенда лабораторного).
- До клем $X1$ і „ \perp ” підімкнути цифровий вольтметр у режимі вимірювання напруги постійного струму на межі „ -100 mV ”, а до клем $X2$ і „ \perp ” – мультиметр у тому ж режимі на межі вимірювання „ -20 V ”.

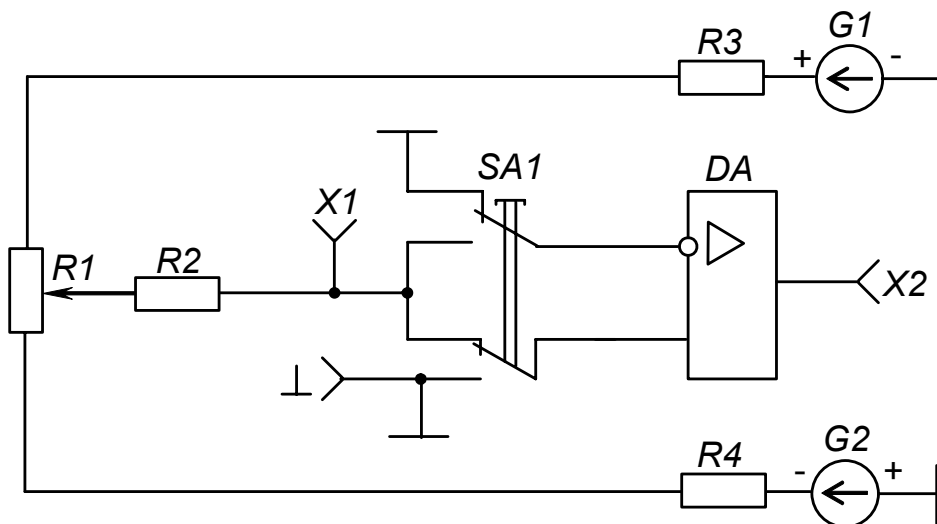


Рис. 3.1 – Схема для дослідження ОП

4.3.1.1. Зняти передатну характеристику ОП для інвертуючого вмикання, $U_{вих} = f(U_{вх})$, для чого перемикач *SA1* встановити у натиснуте положення (світиться сигнальна лампа „*Инв. вкл.*”).

Обертаючи ручку резистора R_1 за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення $U_{вх}$ за цифровим вольтметром і фіксувати за мультиметром відповідні значення $U_{вих}$. Стежити за правильністю полярності подаваної на вхід мультиметра напруги.

Результати вимірів занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Результати зняття передатної характеристики ОП

$U_{вх}$, мВ	-50	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	Вмикання ОП
$U_{вих}$, В											інв.
											неінв.

Продовження табл. 3.1

$U_{\text{вх}}$, мВ	5	10	15	20	25	30	35	40	50	Вмикання ОП
$U_{\text{вих}}$, В										інв.
										неінв.

4.3.1.2. Зняти передатну характеристику ОП для неінвертуючого вмикання, для чого перемикач *SA1* встановити у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа „*Неинв. вкл.*”). Далі методика аналогічна наведених у пп. 4.3.1.1.

4.4. Дослідження типових аналогових пристроїв на ОП

4.4.1. Дослідження пристроїв на ОП виконується за допомогою схеми, наведеної на рис. 3.2 (нижня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

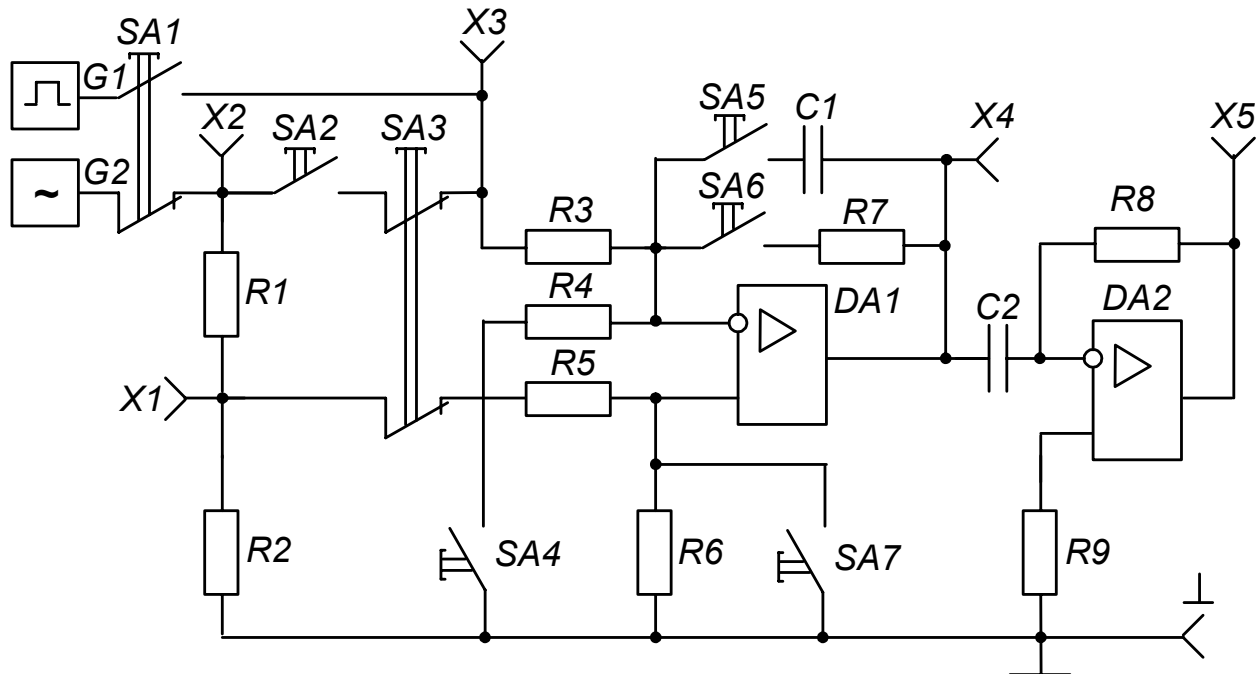


Рис. 3.2 – Схема для дослідження типових аналогових пристроїв на ОП

4.4.2. Зібрати схему інвертуючого підсилювача, для чого перемикачі *SA2*, *SA6* і *SA7* встановити у натиснуте положення, а інші у ненатиснуте.

Задати цифровому вольтметру режим вимірювання напруги змінного струму на межі „~100 m V” (вхід „~300 V”, вимірювальний кабель екранований) і підімкнути його до клем *X2* і „⊥”. Зафіксувати результат вимірювання вхідної напруги підсилювача.

Задати межу вимірювання вольтметра „~10 V”, підімкнути його до клем *X4* і „⊥”. Зафіксувати результат вимірювання вихідної напруги підсилювача. Визначити коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = -\frac{U_{вих}}{U_{вх}}.$$

Відімкнути вольтметр від досліджуваної схеми.

Підімкнути кабель першого каналу осцилографа до клем *X2* і „⊥”, а другого – до клем *X4* і „⊥”. Органи керування осцилографа встановити у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення. Зарисувати осцилограми вхідної і вихідної напруг підси-

лювача (зверніть увагу на те, що вхідна і вихідна напруги інвертуючого підсилювача знаходяться у протифазі).

4.4.3. Зібрати схему неінвертуючого підсилювача, для чого перемикачі *SA4* і *SA6* встановити у натиснуте положення, а інші – у ненатиснуте.

Далі повторити операції за пп. 4.4.2 (зверніть увагу на те, що вхідна і вихідна напруги неінвертуючого підсилювача синфазні).

4.4.4. Зібрати схему підсилювача-віднімача, для чого перемикачі *SA2* і *SA6* встановити у натиснуте положення, а інші – у ненатиснуте. Заміряти значення вхідних і вихідних напруг, підмикаючи цифровий вольтметр по черзі до клем: *X1* і „⊥” – U_{ex1} (межа вимірювання „~100 mV”); *X3* і „⊥” – U_{ex2} (межа вимірювання та ж сама); *X4* і „⊥” – U_{vix} (межа вимірювання „~10 V”).

Визначити коефіцієнт передачі підсилювача-віднімача

$$N = - \frac{U_{vix}}{U_{ex2} - U_{ex1}}.$$

4.4.5. Зібрати схему інвертуючого інтегратора, для чого перемикачі *SA1*, *SA5* і *SA7* встановити у натиснуте положення, а всі інші – у ненатиснуте.

Підімкнути кабель першого каналу осцилографа до клем *X3* і „⊥”, а другого – до клем *X4* і „⊥”.

Зарисувати осцилограми вхідної напруги (за формою близька до прямокутної) і вихідної (пилкоподібна).

Підімкнути кабель другого каналу осцилографа до клем *X5* і „⊥” та зарисувати осцилограму вихідної напруги диференціатора, переконавшись, що за формою вона збігається з вхідною напругою інтегратора.

4.5. Вимкнути прилади і живлення стенда лабораторного.

Навести порядок на робочому місці.

4.6. Обробка результатів експериментів

4.6.1. За даними табл. 3.1 побудувати передатні характеристики ОП і визначити за ними:

1) граничні значення вихідної напруги: $U_{vix\max}^+$; $U_{vix\max}^-$;

2) напругу зсуву (зміщення) нуля $U_{зм0}$;

3) коефіцієнти підсилення ОП за обома входами: як $K_U = \frac{\Delta U_{vix}}{\Delta U_{ex}}$.

4.6.2. За осцилограмами зробити висновки про співвідношення фаз вхідної і вихідної напруг інвертуючого і неінвертуючого підсилювачів, інвертуючого інтегратора. Визначити постійну інтегрування інтегратора.

5. ПОЯСНЕННЯ ДО РОБОТИ

ОП – це підсилювачі постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, що мають диференціальний вхід і один вихід. Виконуються ОП, в основному, у виді інтегральних мікросхем. Свою назву вони отримали завдяки своєму первинному застосуванню: для моделювання математичних операцій в аналогових обчислювальних машинах.

Властивості ОП близькі до властивостей ідеального диференціального підсилювача: симетрія входів, підсилення у широкому діапазоні частот, починаючи від постійного струму, нульова напруга на виході за відсутності сигналу на вході, великий коефіцієнт підсилення (в ідеалі – нескінченний), великий вхідний і малий вихідний опори (в ідеалі – нескінченний і рівний нулю відповідно), великий динамічний діапазон.

Як показано на типовій схемі вмикання рис. 3.3, живлення ОП *DA* здійснюється від двох різнополярних джерел з однаковими абсолютними значеннями е.р.с. E_1 і E_2 . До входів ОП прикладається вхідна напруга $U_{вх}$ на фоні синфазної $U_{сф}$. При цьому ОП підсилює лише $U_{вх}$.

При подачі на неінвертуючий вхід нульового потенціалу, підсилювач є інвертуючим – вхідна і вихідна його напруги при цьому мають різні знаки (у випадку гармонійного сигналу вхідна і вихідна напруги знаходяться у протифазі).

При подачі нульового потенціалу на інвертуючий вхід, підсилювач стає неінвертуючим – знаки вхідної і вихідної напруг співпадають (у випадку гармонійного сигналу – вхідна і вихідна напруги синфазні).

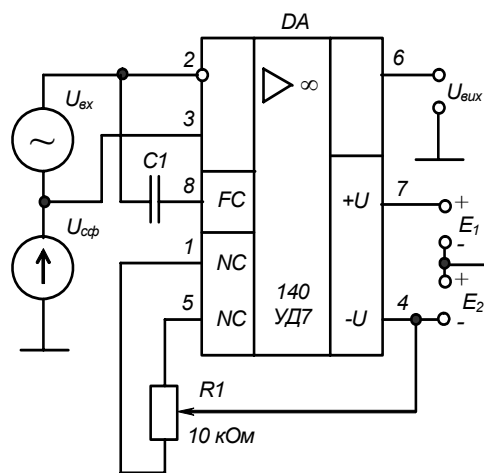


Рис. 3.3 – Схема вмикання ОП типу 140УД7

Найважливішими характеристиками ОП є передатні характеристики, що являють собою залежність вихідної напруги ОП від вхідної за кожним із входів при нульовій напрузі на іншому. Ці характеристики представляють у вигляді двох кривих, що відносяться відповідно до інвертуючого і неінвертуючого входів, як показано на рис. 3.4.

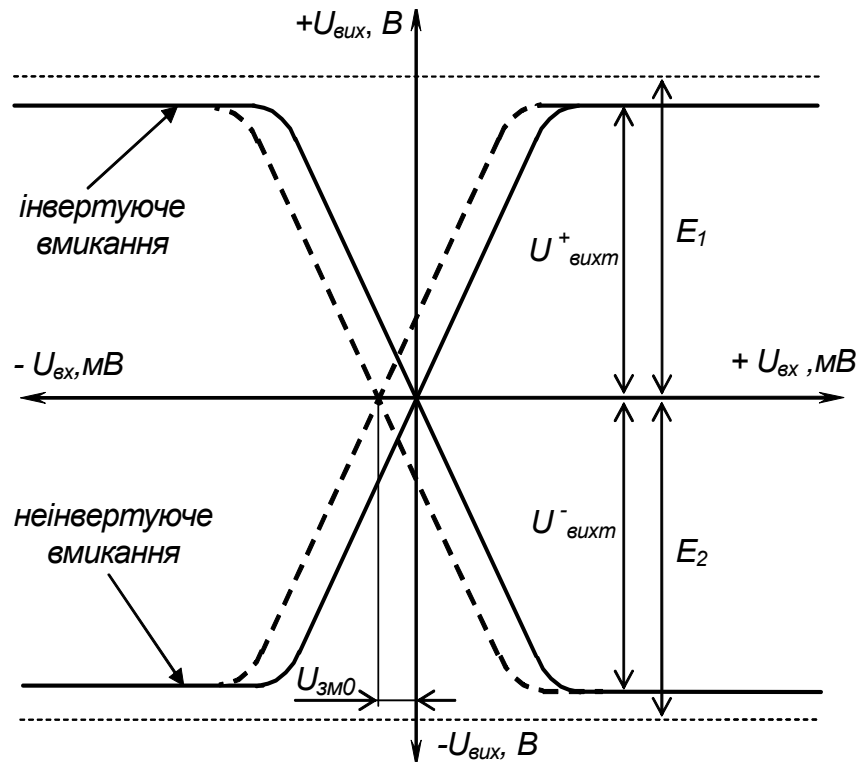


Рис. 3.4 - Передатні характеристики ОП

За передатною характеристикою можна визначити наступні параметри ОП:

$U_{вих\ max}$ – граничне значення вихідної напруги;

K_1, K_2 – коефіцієнти підсилення за входами ОП ($K_1 \approx K_2 = K_U$);

$U_{зм0}$ – напруга зсуву (зміщення) нуля.

За однакових значень е.р.с. джерел живлення граничні значення напруг $U_{вих}^+, U_{вих}^-$ також однакові і близькі до е.р.с. джерел живлення.

$$\text{Коефіцієнт підсилення ОП } K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}.$$

Його значення залежить від типу ОП, і може складати від декількох тисяч до декількох мільйонів.

Напруга зсуву нуля $U_{зм0}$ визначається як напруга, яку необхідно подати на вхід ОП, щоб $U_{вих} = 0$.

Іншими важливими параметрами ОП є вхідний опір, вхідні струми зсуву, різниця і дрейф вхідних струмів зсуву, вихідний опір, частотна смуга пропускання ОП та ін.

Розглянемо деякі типові аналогові пристрої, виконані на ОП.

При аналізі роботи цих пристроїв будемо вважати ОП за ідеальний, тобто:

- 1) $K_U = \infty$ (реально – десятки тисяч - мільйони);
- 2) $R_{вх} = \infty$ за кожним входом (реально – сотні кілоом);
- 3) $R_{вих} = 0$ (реально – менш за 100 Ом).

При цьому будемо враховувати, що у ідеального ОП, якщо він працює у лінійному режимі (на пологій частині передатної характеристики), потенціали обох входів однакові. Тобто його $U_{вх} = 0$.

Дійсно, якщо $K_U = \infty$, то за будь-якого значення вихідної напруги $U_{вих}$, виявляється, що вхідна напруга $U_{вх} \Big|_{K_U \rightarrow \infty} = \frac{U_{вих}}{K_U} = 0$.

Отже, маємо: у лінійному режимі ОП так керує зовнішнім НЗЗ, що напруга між його входами дорівнює нулю.

Реально ця напруга трохи відрізняється від нуля, бо K_U все ж таки менший за безкінечність. Однак для багатьох застосувань сучасні ОП можна вважати за ідеальні. При цьому похибки, зумовлені неврахуванням реальних параметрів, складають долі відсотка.

1) Інвертуючий підсилювач

Інвертуючий підсилювач, схема якого наведена на рис. 3.5 (джерела живлення тут не показані), змінює знак вихідної напруги відносно вхідної.

У ОП, охопленого НЗЗ, у лінійному (підсилювальному) режимі різницю напруг між входами вважаємо рівною нулю:

$U_0 = 0$. Виходячи з цього, потенціал інвертуючого входу (точка **а**) дорівнює потенціалу неінвертуючого, підімкненого до нульової точки. Тоді вхідний струм підсилювача становить

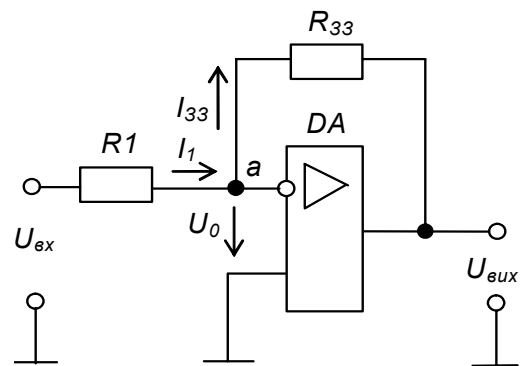


Рис. 3.5 - Інвертуючий підсилювач на ОП

$$I_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{ex}}}{R_1}. \quad (3.1)$$

Це значить, що джерелом вхідного сигналу цей пристрій сприймається як резистор R_1 – вхідний опір інвертуючого підсилювача дорівнює опоріві резистора R_1 .

Оскільки у ОП $R_{\text{ex}} = \infty$, то струм I_{ex} , що втікає в точку **a**, витікати з неї може тільки через R_{33} у вихід ОП і далі в одне з джерел живлення.

$$\text{Отже} \quad I_{\text{ex}} = I_{33}. \quad (3.2)$$

Щоб забезпечити протікання такого струму через R_{33} , на виході ОП повинна бути напруга

$$-U_{\text{вих}} = I_{33} R_{33}. \quad (3.3)$$

З урахуванням виразів (3.1) – (3.3) знайдемо значення коефіцієнта підсилення інвертуючого підсилювача

$$K_{U\ 33} = \frac{-U_{\text{вих}}}{U_{\text{ex}}} = \frac{-I_{33} R_{33}}{I_{\text{ex}} R_1} = -\frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.4)$$

2) Неінвертуючий підсилювач

Схема неінвертуючого підсилювача наведена на рис. 3.6.

Виходячи з викладених вище міркувань, при $U_0 = 0$ напруга, що прикладена до R_1 , дорівнює U_{ex} , а через R_1 протікає струм

$$I_{R1} = \frac{U_{\text{ex}}}{R_1}. \quad (3.5)$$

$$\text{Це значить, що} \quad I_{R1} = I_{33}. \quad (3.6)$$

Отже, щоб забезпечити протікання струму I_{33} через резистори R_1 і R_{33} , на виході ОП повинна бути напруга

$$U_{\text{вих}} = I_{33}(R_1 + R_{33}). \quad (3.7)$$

З урахуванням (3.5) – (3.7) коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача на ОП

$$K_{U\ 33} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{ex}}} = \frac{I_{33}(R_1 + R_{33})}{I_{R1} R_1} = \frac{R_1 + R_{33}}{R_1} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.8)$$

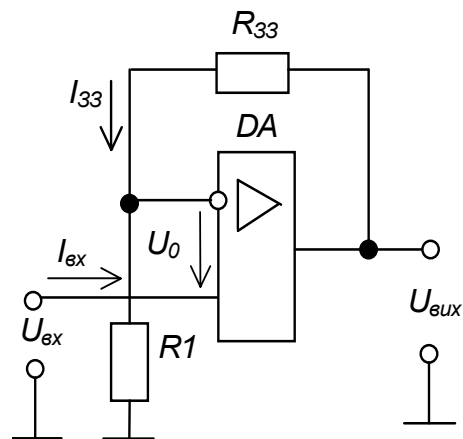


Рис. 3.6 - Неінвертуючий підсилювач на ОП

Якщо задати $R_{33} = 0$, а $R_1 = \infty$, то одержимо повторювач напруги – рис. 3.7. Він має великий вхідний опір і малий вихідний і використовується для узгодження джерел сигналу, що мають великий опір з низькоомними навантаженнями.

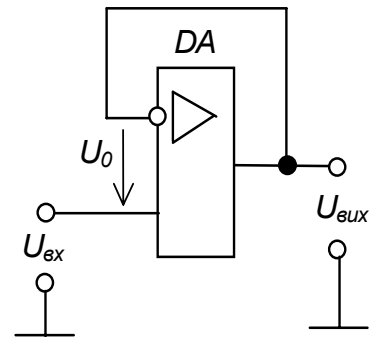


Рис. 3.7- Повторювач напруги

3) Підсилювач-віднімач

Схема підсилювача-віднімача наведена на рис. 3.8.

Якщо у цій схемі прийняти, що $U_{ex1} = 0$ (тобто припустимо, що верхній вхід під'єднано до точки „ \perp ”), схема зводиться до неінвертуючого підсилювача (див. рис. 3.6), на вхід якого сигнал U'_{ex2} подається через дільник R_2, R_3 .

$$\text{Тоді} \quad U'_{ex2} = U_{ex2} \frac{R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.9)$$

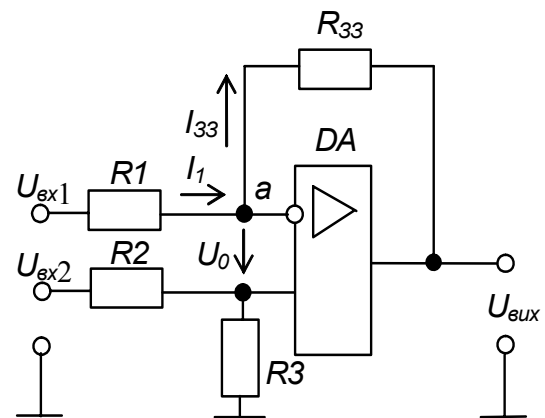


Рис. 3.8 - Підсилювач-віднімач

З урахуванням (3.8) одержимо

$$U'_{vux} = U_{ex2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1} \right). \quad (3.10)$$

Якщо тепер прийняти $U_{ex2} = 0$ (до точки „ \perp ” під'єднано нижній вхід підсилювача), то схема зводиться до інвертуючого підсилювача (див. рис. 3.5). Наявність резисторів R_2 і R_3 не впливає на нульовий потенціал неінвертуючого входу ОП (маємо вхід, підімкнений до нульової точки через провідник з опором $R_3/R_2 + R_3$).

$$\text{Тоді відповідно до (3.4)} \quad U''_{vux} = -U_{ex1} \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.11)$$

За одночасної дії обох вхідних сигналів

$$U_{vux} = U'_{vux} + U''_{vux} = U_{ex2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1} \right) - U_{ex1} \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.12)$$

$$\text{Якщо задати} \quad R_1 = R_2 = R; \quad (3.13)$$

$$R_{33} = R_3 = NR, \quad (3.14)$$

$$\text{то отримаємо} \quad U_{vux} = N(U_{ex2} - U_{ex1}). \quad (3.15)$$

4) Інвертуючий інтегратор

Схема інвертуючого інтегратора на ОП наведена на рис. 3.9.

Як видно, вона відрізняється від схеми інвертуючого підсилювача, (див. рис. 3.5) тим, що замість $R_{зз}$ ввімкнено конденсатор C .

Згідно з (3.1) і (3.2)

$$i_R = \frac{U_{вх}}{R}; \quad (3.16)$$

$$i_C = i_R. \quad (3.17)$$

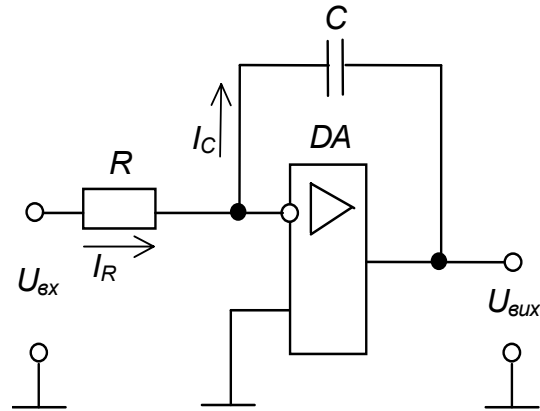


Рис. 3.9 – Інвертуючий інтегратор

Оскільки конденсатор ввімкнено між виходом ОП і точкою **a**, що має нульовий потенціал, то

$$U_{вих} = -U_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int U_{вх} dt, \quad (3.18)$$

де $\frac{1}{RC}$ – постійна інтегрування.

Якщо до входу пристрою прикласти постійну напругу, то

$$i_R = i_C = \frac{U_{вх}}{R} = const. \quad (3.19)$$

Тобто конденсатор заряджається струмом постійного значення, і напруга на ньому змінюється лінійно:

$$U_{вих} = -\frac{1}{RC} U_{вх} \cdot t. \quad (3.20)$$

Це є рівняння прямої, що починається з нуля.

Отже у даному разі на виході інтегратора маємо напругу, що лінійно змінюється. Така його властивість використовується в генераторах пилоподібної напруги.

5) Диференціатор

Схема диференціатора наведена на рис. 3.10.

Відомо, що

$$i_C = C \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (3.21)$$

Оскільки $i_C = i_{33} = -\frac{U_{вих}}{R}$,

то $i_C = C \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (3.22)$

Тоді $U_{вих} = -RC \frac{dU_{вх}}{dt}.$

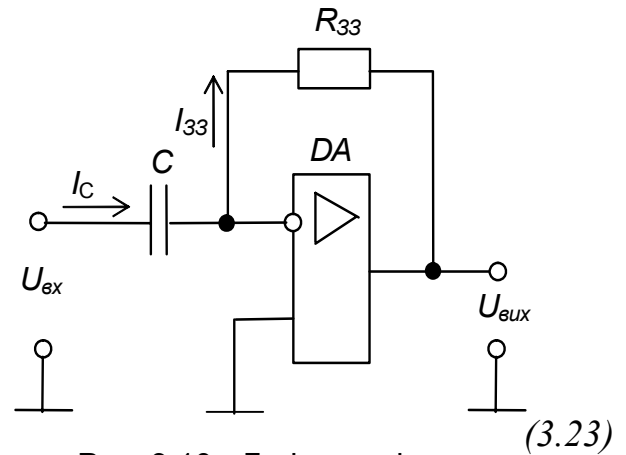


Рис. 3.10 - Диференціатор

Якщо вхідна напруга диференціатора змінюється лінійно $\left(\frac{dU_{вх}}{dt} = const \right)$, то згідно з (3.23) вихідна напруга матиме постійне значення.

На закінчення зазначимо, що, при роботі підсилювачів на ОП у лінійному режимі і за наявності глибокого НЗЗ, ОП за своїми параметрами істотно наближається до ідеального, бо різко зростає його вхідний опір і зменшується вихідний.

Перше, наприклад, пояснюється тим, що через малу різницю потенціалів між входами ($U_0 \rightarrow 0$) незначні і вхідні струми.

З іншого боку, з теорії зворотних зв'язків відомо, що якщо коефіцієнт зворотного зв'язку

$$\chi = \frac{U_{33}}{U_{вих}} = \frac{R_1}{R_1 + R_{33}}, \quad (3.24)$$

то $R_{вх33} = R_{вх} (1 + K_U \chi), \quad (3.25)$

$$R_{вих33} = \frac{R_{вих}}{(1 + K_U)}, \quad (3.26)$$

де $R_{вх33}$ і $R_{вих33}$ – вхідний і вихідний опори підсилювача, охопленого НЗЗ.

Розглянуті схеми на ОП є основою для побудови найрізноманітніших пристроїв аналогової техніки: підсилювачів, суматорів, активних фільтрів, генераторів і т.п.

Контрольні запитання

- 1) Поясніть будову ОП і вкажіть їхні властивості.**
- 2) Поясніть вид передатних характеристик ОП для різних схем вмикання та як за ними визначити коефіцієнт підсилення ОП і напругу зсуву нуля.**
- 3) Поясніть принцип дії інвертуючого підсилювача на ОП.**
- 4) Поясніть принцип дії неінвертуючого підсилювача, на ОП.**
- 5) Поясніть принцип дії підсилювача-віднімача на ОП.**
- 6) Поясніть принцип дії інвертуючого інтегратора на ОП.**
- 7) Поясніть принцип дії диференціатора на ОП.**
- 8) Як побудувати суматор на ОП?**
- 9) Поясніть, за рахунок чого властивості пристроїв, побудованих на ідеальному ОП, визначаються тільки параметрами елементів зворотного зв'язку?**

ЛІТЕРАТУРА

1. Колонтаєвський, Ю.П. Електроніка і мікросхемотехніка [Текст]: підручник для студентів вузів, 2-е вид. / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; за ред. докт. техн. наук, проф. А.Г. Соскова - К.: Каравела, 2009. - 416 с. – розділ 4.
2. Колонтаєвський, Ю.П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум [Текст]: навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; за ред. докт. техн. наук, проф. А.Г. Соскова - К.: Каравела, 2004. - 432 с. (та інші видання цього посібника) - розділ 4.
3. Руденко, В.С. Основы промышленной электроники [Текст]: учебник / В.И. Сенько, В.В. Трифонюк – К.: Вища школа, 1985, 400 с. - с. 146-150, 154-173.
4. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника [Текст]: учебник для вузов / Ю. С. Забродин – М.: Высш. школа, 496 с. - с. 142-160.
5. Горбачов, Г.И. Промышленная электроника [Текст]: учебник для вузов / Г.И. Горбачов, Е.Е. Чаплыгин – М.: Энергоатомиздат, 1988, 320 с. - с. 65-71, 76-88.
6. Красько А.С., Скачко К.Г. Промышленная электроника [Текст]: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А.С. Красько, К.Г. Скачко – Минск: Высшая школа, 1984, 208 с. - с. 127-132.

ЗМІСТ ЗВІТУ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ

Звіт про лабораторну роботу – це документ, що вміщує опис проведених експериментів, отримані результати у вигляді таблиць, графіків (осцилограм) тощо, розрахункові значення та висновки з виконаної роботи.

Звіт містить:

1) **титульний лист**, на якому необхідно вказати (приклад виконання титульного листа наведено на рис. А1):

- а) адміністративну приналежність навчального закладу;
- б) назву навчального закладу (повну та скорочену);
- в) назву кафедри, що проводить заняття;
- г) слова „ЗВІТ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ №” і далі номер та назву лабораторної роботи;
- д) номер курсу і групи, прізвище та ініціали виконавця;
- е) підпис виконавця і дату виконання роботи;
- ж) вчене звання (посаду), вчену ступінь, прізвище та ініціали викладача;
- з) назву міста та рік складання документа;

2) **текст звіту**, до якого входять:

- а) мета лабораторної роботи;
- б) перелік устаткування та вимірювальних приладів;
- в) схеми установок, на яких проводились експерименти, або схеми електронних пристроїв, що досліджувались (**виконуються згідно з вимогами державних стандартів і з застосуванням креслярського знаряддя** – рекомендується застосовувати радіотехнічний трафарет);
- г) таблиці з експериментальними і розрахунковими даними та побудовані за ними графіки;
- д) розрахункові формули (у схемах, таблицях і формулах необхідно застосовувати стандартні умовні позначення);
- е) осцилограми;
- ж) висновки, у яких наводяться пояснення отриманих результатів.

Міністерство освіти і науки України
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА
(ХНУМГ)

Кафедра теоретичної та загальної електротехніки

ЗВІТ

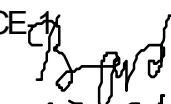

про лабораторну роботу № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ
ТА ОДИНОЧНИХ ПІДСИЛЮЮЧИХ КАСКАДІВ

Виконала: студентка 3 курсу групи ЕСЕ-11

Вакуленко К.Є.

Прийняв: доцент, канд. техн. наук


18.09.12

18.09.12

Колонтаєвський Ю.П.

Харків – 2013

Рис. А1 – Приклад виконання титульного листа

ЗМІСТ

Техніка безпеки при виконанні лабораторних робіт	3
ВСТУП	4
Лабораторна робота № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ ТА ОДИНОЧНИХ ПІДСИЛЮЮЧИХ КАСКАДІВ	6
Лабораторна робота № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОКАСКАДНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ І ІНТЕГРАЛЬНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ	32
Лабораторна робота № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ І ЇХНІХ ТИПОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ	45
ДОДАТОК А ЗМІСТ ЗВІТУ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ	57

Навчальне видання

Промислова електроніка. Підсилюючі пристрої:
методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
(для студентів усіх форм навчання напряму підготовки
6.050701 - "Електротехніка та електротехнології")

Укладачі: **СОСКОВ** Анатолій Георгійович,
КОЛОНТАЄВСЬКИЙ Юрій Павлович,
БІЛОУСОВ Олександр Федорович,
ФОРКУН Яна Борисівна,
САБАЛАЄВА Наталія Олегівна

Відповідальний за випуск *Ю. П. Колонтаєвський*

За авторською редакцією

Дизайн обкладинки *Ю. П. Колонтаєвського*

Комп'ютерне верстання *Ю. П. Колонтаєвського*

План 2012, поз. 315 М

Підп. до друку 06.09.2012 р.
Друк на ризографі
Зам. №

Формат 60 x 84 1/16
Ум. друк. арк. 2,0
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.